

DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ COM PERNAS INSPIRADO NO ALFAIATE

João Pedro Fernandes Monteiro Pereira



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2014

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: João Pedro Fernandes Monteiro Pereira, N° 1060396, 1060396@isep.ipp.pt

Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Coorientação: André Miguel Pinheiro Dias, apd@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

26 de novembro de 2014

Agradecimentos

A realização deste trabalho não seria possível sem a colaboração de algumas pessoas, às quais gostaria de deixar uma palavra de agradecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais, que me proporcionaram todas as condições necessárias à realização dos meus estudos ao longo do curso, e estiveram presentes nos momentos em que mais precisei.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos, em especial à minha namorada, por toda a paciência que teve comigo e todo o apoio que me prestou.

Por fim gostaria de deixar uma sincera palavra de agradecimento ao meu orientador, Eng^o Manuel Silva, e ao coorientador, Eng^o André Dias, pela colaboração e orientação que me prestaram ao longo da realização de todo o trabalho.

Resumo

A elaboração deste trabalho surge no âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação, integrada no Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

O trabalho enquadra-se no âmbito da robótica de inspiração biológica, mais concretamente no desenvolvimento de um robô que apresente características de locomoção similares ao inseto Alfiate, modificando para este efeito um robô hexápode já existente.

Inicialmente efetuou-se um estudo sobre a biologia do Alfiate e dos vários tipos de padrões de locomoção adotados pelos animais. De seguida foi realizado um estudo sobre alguns robôs já existentes inspirados neste inseto.

Após a realização desta fase de estudo, foram implementadas modificações ao robô hexápode, de forma a este conseguir apoiar-se e movimentar-se sobre a superfície da água. Para tal foram utilizados apoios em esferovite para as pernas, servomotores para a atuação e um sensor de IRPD para orientar o robô na sua trajetória. Em termos de controlo da estabilidade do corpo utilizou-se um giroscópio para permitir ao robô manter o seu corpo horizontal durante a locomoção em águas agitadas.

Este trabalho termina com a realização de testes a diferentes padrões de locomoção, de forma a validar o que apresenta a melhor resposta em termos de velocidade.

Palavras-Chave

Alfiate, padrões de locomoção, robô, STM32F429IDISCOVERY, servomotores, giroscópio, IRPD.

Abstract

The work presented in this document is an outcome of the course Thesis/Dissertation, from the study plan of the Master in Electrical and Computer Engineering at the School of Engineering of the Polytechnic Institute of Porto.

This work is an application of biological concepts to robotic devices. It was developed a robot inspired in the water strider having as a base platform an existent hexapod robot.

In a first stage, a study of gaits of various animals, and in particular the gait of water striders, is presented. Next, is provided a state-of-the-art on the main applications of biological-based gait in robots than can be found in the literature.

In order to provide motion and floating capabilities to the existent robot, several structural and mechanical modifications are performed. Were applied Styrofoam supports to the legs, servomotors to actuate the mechanism and IRPD sensors to detect objects and guide the robot through the correct path. In addition, a gyroscope is used to control the stability of the robot and allow it to keep its balance while floating in turbulent waters.

Practical experiments and discussion of results are presented to validate the approach and to find out the best motion parameters for the gait applied to the robot.

Keywords

Water Strider, gaits motion, robot, STM32F429IDISCOVERY, servomotor, gyroscope, IRPD.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
ACRÓNIMOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2. ESTUDO DO ALFAIATE E DOS PADRÕES DE LOCOMOÇÃO.....	3
2.1. BIOLOGIA DO ALFAIATE	3
2.2. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO.....	6
2.2.1. <i>Padrões de locomoção de hexápodes</i>	7
2.2.2. <i>Padrões de locomoção de quadrúpedes</i>	9
2.2.3. <i>Padrões de locomoção de bípedes.</i>	12
3. ROBÔS DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA	15
3.1. LOCOMOÇÃO ROBÓTICA.....	16
3.1.1. <i>Robôs com movimentação deslizante</i>	16
3.1.2. <i>Robôs com movimentação por rodas ou lagartas</i>	18
3.1.3. <i>Robôs com movimentação utilizando pernas</i>	18
3.2. ROBÔS DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA BASEADOS NO ALFAIATE	20
3.2.1. <i>Robô Stride [12]</i>	20
3.2.2. <i>Robô Water Dance [13]</i>	21
3.2.3. <i>Robô Water Dance II-a [14]</i>	22
3.2.4. <i>Robô Robostrider [2]</i>	24
4. ARQUITETURA E MÓDULOS UTILIZADOS	25
4.1. ROBÔ HEXÁPODE	26
4.2. MINI SSC II SERIAL SERVO CONTROLLER [15]	28
4.2.1. <i>Configuração da placa Mini SSC II</i>	29
4.2.2. <i>Ligações elétricas</i>	30
4.2.3. <i>Programação</i>	30
4.3. SERVOMOTOR HITEC HS-300	31

4.4.	LYNXMOTION IRPD-01 VER 5.0. [18].....	33
4.4.1.	<i>Ligações</i>	34
4.4.2.	<i>Programação</i>	34
4.5.	STM32 DISCOVERY	35
4.5.1.	<i>Hardware</i>	35
4.5.2.	<i>Ferramenta de desenvolvimento para STM32</i>	37
4.5.3.	<i>Giroscópio</i>	37
4.5.4.	<i>L3GD20 [22]</i>	39
4.6.	ALIMENTAÇÃO	39
5.	IMPLEMENTAÇÃO DO ROBÔ	42
5.1.	ESTRUTURA.....	42
5.1.1.	<i>Estática de fluídos</i>	42
5.1.1.1.	<i>Densidade</i>	43
5.1.1.2.	<i>Lei de Arquimedes</i>	44
5.1.2.	<i>Base do robô</i>	45
5.2.	CONTROLO DO ROBÔ	47
5.2.1.	<i>Controlo dos servomotores</i>	49
5.2.2.	<i>Leitura do sensor IRPD</i>	51
5.2.3.	<i>Leitura do giroscópio</i>	51
5.3.	PROCESSO DE MOVIMENTAÇÃO	53
5.3.1.	<i>Movimentação com o módulo IRPD</i>	53
5.3.2.	<i>Movimentação com o Giroscópio</i>	54
6.	TESTES REALIZADOS À LOCOMOÇÃO DO ROBÔ.....	55
6.1.	LOCAL DE ENSAIO	55
6.2.	TESTES PRELIMINARES	56
6.2.1.	<i>Testes de fluutuabilidade e estabilidade</i>	56
6.2.2.	<i>Testes do giroscópio</i>	56
6.3.	TESTES DA LOCOMOÇÃO	58
6.3.1.	<i>Análise dos resultados obtidos</i>	61
7.	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....	69
	ANEXO A. ESQUEMA DE LIGAÇÕES DO HARDWARE	71
	ANEXO B. DIMENSÕES DOS APOIOS PARA O ROBÔ HEXÁPODE	75

Índice de Figuras

Figura 1	Inseto Alfaiate [1].....	3
Figura 2	Detalhe da secção de uma perna do Alfaiate [1].	4
Figura 3	Pêlo da perna do Alfaiate [1].....	4
Figura 4	O fluxo gerado pelo movimento do Alfaiate. a) Vista lateral, onde se pode visualizar um pequeno vórtice a ser formado na água. b) Vista de cima, verifica-se a criação de vórtices. c) Uma ilustração dos vórtices criados [2].	5
Figura 5	Esquema de movimentação das pernas do Alfaiate [3].....	6
Figura 6	Diagrama da sequência de locomoção [5].....	7
Figura 7	Fotografia de um inseto em marcha rápida [7].....	8
Figura 8	Robô ANNA KONDA [10].....	18
Figura 9	Robô BigDog [11].....	19
Figura 10	Protótipo do robô na superfície da água [12].	20
Figura 11	Esquema do mecanismo em forma de T (a) e representação de I e J como atuadores colaterais (b) [12].	21
Figura 12	Esquema do Water Dance ilustrando todo o seu conteúdo [13].....	22
Figura 13	Esquema e foto do robô Dancer II-a: A - dez pernas de suporte; B - duas pernas de direção; C - corpo com uma placa base, uma placa elétrica, duas baterias no suporte e dois motores DC [14].....	23
Figura 14	ROBOSTRIDER em comparação com o inseto Alfaiate [2].	24
Figura 15	Arquitetura geral de funcionamento do robô.....	26
Figura 16	Estrutura inicial do robô vista de lado.	27
Figura 17	Estrutura inicial do robô vista de cima.	28
Figura 18	Descrição da placa Mini SSC II [15].....	29
Figura 19	Esquema de ligações da porta RS232 [15].....	30
Figura 20	Gama de valores a enviar em cada byte [15].....	31
Figura 21	Servomotor Hitec HS-300 [16]	31
Figura 22	Diagrama de blocos de um servomotor [17].	32
Figura 23	Descrição do sinal aplicado a um servomotor [17].	32
Figura 24	Módulo IRPD – 01 da Lynxmotion [15].	33
Figura 25	Ilustração do alcance do sensor IRPD [18].	34
Figura 26	Placa STM32F429IDISCOVERY [19].	35
Figura 27	Diagrama de blocos da placa STM32F429IDISCOVERY [19].....	36
Figura 28	Ambiente gráfico do Atollic TrueStudio.....	38
Figura 29	Composição de um giroscópio básico [21].	38

Figura 30	Vista de topo do componente L3GD20 [22].	39
Figura 31	Diagrama de blocos do sistema de alimentação.	40
Figura 32	Demonstração da diferença de peso dentro e fora da água [25].	44
Figura 33	Robô hexápode alterado.	46
Figura 34	Acessório de nylon.	47
Figura 35	Extremidade das pernas do meio.	47
Figura 36	Fluxograma do funcionamento geral do programa.	48
Figura 37	Diferenças entre as duas comunicações.	49
Figura 38	Esquema de ligações STM32F429IDISCOVERY - HD74LS00P - Mini SSC II.	49
Figura 39	Configuração da <i>USART</i> .	50
Figura 40	Exemplo de movimentação do servomotor.	51
Figura 41	Exemplo da comunicação da placa STM32F429IDISCOVERY com o módulo IRPD.	52
Figura 42	Exemplo da configuração do giroscópio.	52
Figura 43	Sequência de movimentação.	53
Figura 44	Sequência de movimentação dos servomotores.	54
Figura 45	Tanque do LSA	56
Figura 46	Primeiro teste efetuado ao apoio.	57
Figura 47	Segundo teste efetuado ao apoio.	57
Figura 48	Teste de inclinação do robô.	58
Figura 49	Robô com o nível usado nos testes.	59
Figura 50	Vista do papel com a função de guia.	60
Figura 51	Sequência de imagens de uma correção de direção.	62
Figura 52	Gráfico ilustrativo da variação das velocidades.	62
Figura 53	Esquema elétrico das ligações do <i>hardware</i> geral.	71
Figura 54	Esquema de ligações mais detalhado.	72
Figura 55	Esquema de ligações das placas Mini SCC II aos servos motores.	73
Figura 56	Dimensões dos apoios para o robô hexápode.	75

Índice de Tabelas

Tabela 1	Padrões de locomoção dos quadrúpedes a baixa velocidade [4].	10
Tabela 2	Padrões de locomoção dos quadrúpedes a média velocidade [4].	11
Tabela 3	Padrões de locomoção dos quadrúpedes a elevada velocidade [4].	12
Tabela 4	Exemplos de padrões de locomoção de bípedes [4].	13
Tabela 5	Tipos de locomoção [9].	17
Tabela 6	Tabela de verdade do sensor IRPD [18].	34
Tabela 7	Densidade de diferentes tipos de materiais.	43
Tabela 8	Testes para uma amplitude de 101° com um tempo de ciclo 0,3 segundos.	60

Acrónimos

DC	–	<i>Direct Current</i>
EUA	–	Estados Unidos da América
I ² C	–	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IRPD		<i>Infra Red Proximity Detector</i>
ISEP	–	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LED	–	<i>Light-Emitting Diode</i>
LiPo	–	<i>Lithium Polymer Synchronous</i>
LSA	–	Laboratório de Sistemas Autónomos
MEMS	–	<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>
PWM	–	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RAM	–	<i>Random Access Memory</i>
SPI	–	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USART	–	<i>Asynchronous Receiver Transmitter</i>
VDC	–	<i>Voltage Direct Current</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este trabalho foi realizado no âmbito da unidade curricular de Tese / Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, do ramo Automação e Sistemas do Instituto Superior de Engenharia do Porto. O projeto enquadra-se no âmbito da robótica de inspiração biológica, mais concretamente no desenvolvimento de locomoção similar ao inseto Alfaiate.

Uma das atividades-chave dos sistemas robóticos móveis diz respeito à forma como estes se movimentam ou, por outras palavras, à sua locomoção. Como resultado do contínuo processo evolutivo de adaptação ao meio ambiente, as espécies animais desenvolveram variadas formas de locomoção que, pela sua eficácia e simplicidade, têm inspirado diversos trabalhos na área da robótica.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto consistiu no estudo e desenvolvimento de um robô capaz de efetuar uma locomoção similar à de um inseto, em particular o inseto Alfaiate. Terá de ser capaz de se deslocar sobre a água e adaptar-se à ocorrência de ondulação, mantendo o corpo estável e na horizontal. Para tal, foi feita uma modificação de um robô hexápode, para poder deslocar-se sobre a superfície da água, sendo capaz de manter uma trajetória, ou seguir um objeto. Pela complexidade do projeto, o trabalho realizado foi dividido em tarefas, tais como:

- Estudar a biologia do inseto Alfaiate e a sua locomoção;

- Estudar alguns tipos de robôs inspirados na biologia dos insetos;
- Alterar a estrutura de um robô hexápode para poder movimentar-se sobre a água;
- Implementação no robô hexápode dos padrões de locomoção do inseto Alfaiate;
- Implementação de um método de controlo de estabilidade do robô hexápode com base na informação de um giroscópio;
- Realizar testes para verificar qual o melhor padrão de locomoção.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório está organizado da seguinte forma: no primeiro capítulo efetua-se uma abordagem ao projeto e aos seus objetivos.

No Capítulo 2, é efetuado um estudo teórico sobre o inseto Alfaiate e a sua forma de locomoção. Posteriormente abordam-se, de uma forma teórica, alguns dos tipos de padrões de locomoções de vários animais com diferentes números de pernas.

O Capítulo 3 demonstra vários tipos de locomoção na robótica, assim como vários tipos de robôs existentes inspirados na biologia em geral e na locomoção do Alfaiate em particular.

No quarto capítulo descrevem-se, de forma detalhada, todos os módulos de *hardware* e *software* que foram implementados.

O Capítulo 5 apresenta a estrutura utilizada no robô alfaiate, o seu processo de controlo e características de movimentação.

No capítulo 6 descrevem-se os testes realizados e respetivos resultados obtidos, permitindo-se identificar qual o melhor padrão de locomoção para o robô desenvolvido.

Por último, no Capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e perspetivas de trabalho futuro.

2. ESTUDO DO ALFAIATE E DOS PADRÕES DE LOCOMOÇÃO

Neste capítulo é abordada a constituição fisiológica do inseto vulgarmente designado por Alfaiate, de modo a compreender o seu padrão de locomoção. Adicionalmente, são demonstrados outros tipos de padrões de locomoção animais.

2.1. BIOLOGIA DO ALFAIATE

O alfaiate é um inseto da família *Gerridae*, de seis pernas e corpo muito fino e alongado, como demonstra a Figura 1. Pode medir entre 8 e 10 milímetros de comprimento, sendo especialmente conhecido pela sua capacidade de andar sobre a água. O seu habitat natural são lagos e rios, locais de água doce e água pouco movimentada, preferindo locais com abundância de insetos e/ou zooplâncton, que contenham várias pedras e plantas para colocação de ovos.

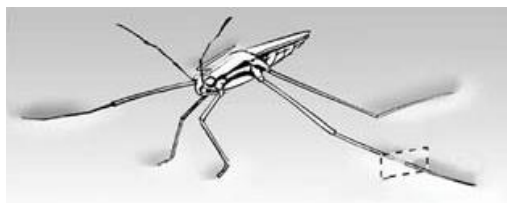


Figura 1 Inseto Alfaiate [1].

A sua capacidade de andar sobre a água advém da tensão superficial que é criada à superfície da água, devido à densidade das suas patas ser menor em relação à da água. As suas patas são compostas por uma junção de pêlos, tendo um raio de 40 μm como se pode verificar pelas Figura 2 e Figura 3 [1].

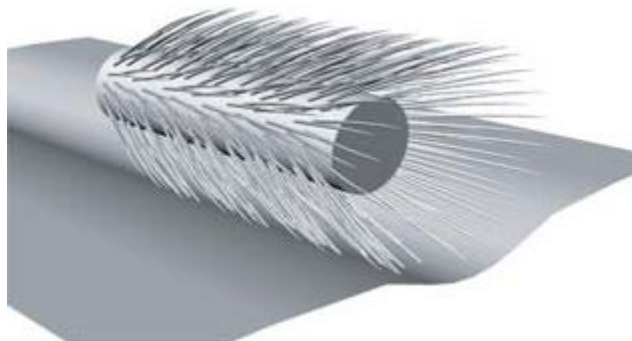


Figura 2 Detalhe da secção de uma perna do Alfaiate [1].



Figura 3 Pêlo da perna do Alfaiate [1].

As suas duas pernas dianteiras são mais curtas que as restantes, sendo utilizadas essencialmente para se alimentar e para se suportar sobre a água.

Os seus movimentos são efetuados pelas pernas do meio e traseiras. À primeira vista, a única manifestação visível de movimento diz respeito às ondas propagadas na água. Contudo, uma análise mais detalhada permite verificar que aquando do contacto das pernas sobre a água são criados dois vórtices, como demonstra a Figura 4.

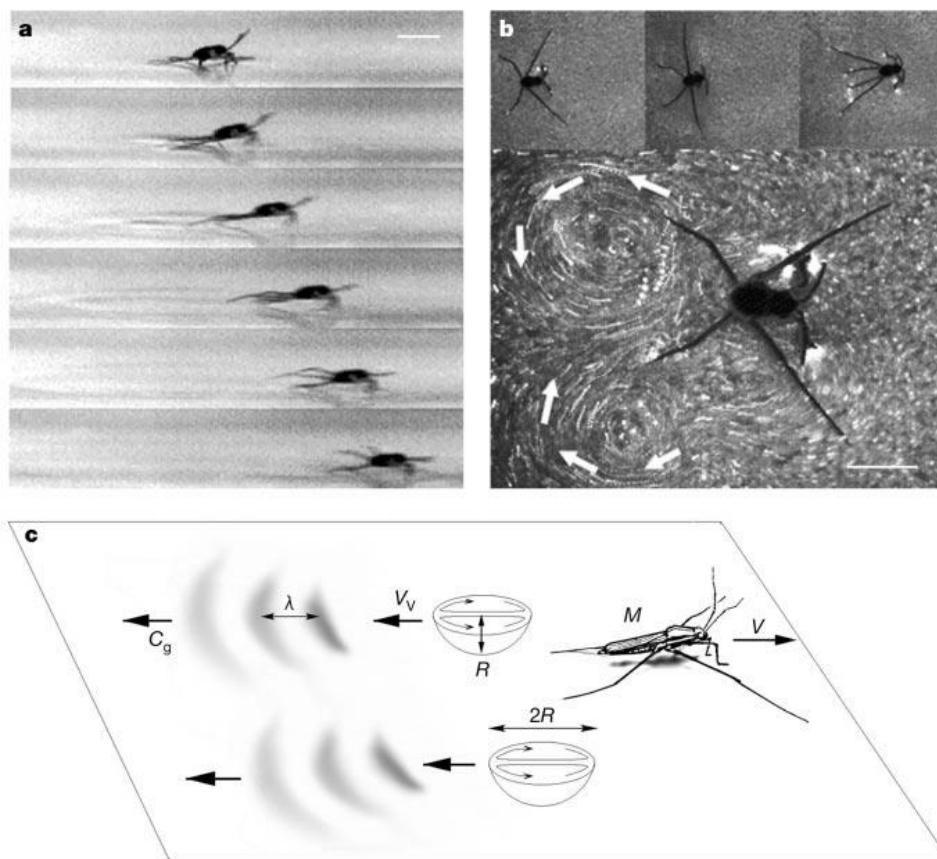


Figura 4 O fluxo gerado pelo movimento do Alfaiate. a) Vista lateral, onde se pode visualizar um pequeno vórtice a ser formado na água. b) Vista de cima, verifica-se a criação de vórtices. c) Uma ilustração dos vórtices criados [2].

O alfaiate movimenta-se através de pequenos impulsos na água, para cima e para a frente, separando-se ligeiramente da água no início do movimento. Quando inicia o movimento, as pernas do meio e as pernas traseiras são utilizadas como remos, movimentando-as para trás. De seguida impulsiona todo o seu corpo para a frente, levantando-o da água.

Ao terminar o movimento, ele utiliza as pernas do meio como forma de se imobilizar e voltar à posição inicial, como demonstra a Figura 5.

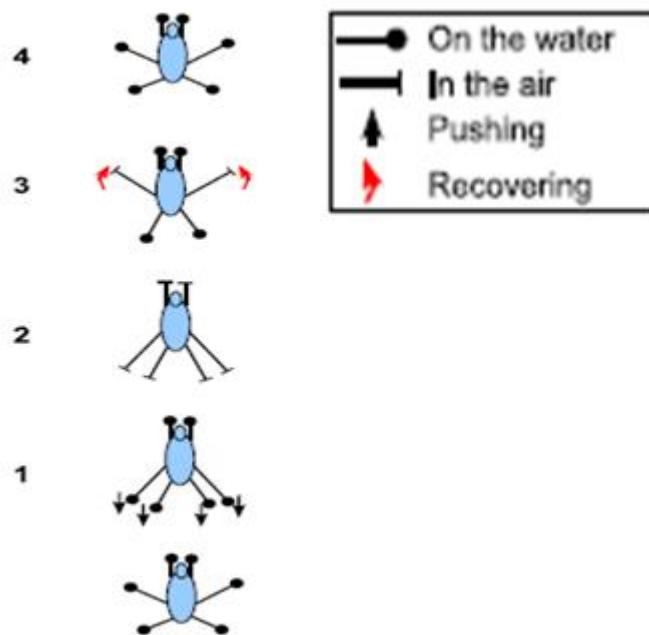


Figura 5 Esquema de movimentação das pernas do Alfaite [3].

2.2. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO

Esta secção aborda os padrões de locomoção dos organismos para a sua movimentação.

A perna é considerada um elemento de locomoção descontínua. Tal deve-se ao facto de esta se levantar e se movimentar para um novo ponto de apoio para ser colocada novamente no solo, ficando assim à espera de iniciar um novo movimento. Esta sequência é descrita por um padrão de locomoção. Este padrão descreve o movimento conjunto das pernas, desde o momento em que se levanta o pé, até ao local onde é colocado de novo no solo, conjugando estas ações com o movimento do corpo e os seus graus de liberdade.

Nesta sequência de movimento, é usual designar os seguintes termos [4]:

- Tempo de ciclo: tempo necessário para completar o ciclo de locomoção, numa locomoção periódica – onde cada perna vai retornar à sua posição relativa.
- Fase da perna i : fração do ciclo temporal, que corresponde ao atraso do tempo entre a colocação da primeira perna no solo e a colocação da perna i no solo.
- Tempo de suporte: tempo em que a perna se encontra em contacto com o solo e suporta peso.

- Tempo de transferência: fração do tempo em que a perna está a deslocar-se para o próximo local de apoio.
- Fator de ocupação, β : fração temporal do tempo de ciclo que corresponde à fase de suporte.

A primeira referência que surgiu neste âmbito foi o trabalho de Muybridge em 1899 [5], no qual este fotografou o galopar de um cavalo usando uma série de 24 câmaras, verificando assim o padrão de movimento do cavalo. Depois de analisar as fotografias, Muybridge conseguiu indicar a sequência de combinação das pernas de apoio em cada ciclo de locomoção (ver Figura 6 (a)). Os círculos pretos indicam as pernas apoiadas no chão, e as setas a direção do movimento.

Mais tarde, em 1965, Hildebrand [6], ao observar os primatas, concluiu que o conceito de locomoção pode ser descrito como um conjunto de padrões simétricos. O passo, sendo a distância percorrida durante um ciclo de locomoção, possui duas características: a) o fator de ocupação que corresponde à percentagem de tempo no qual a perna se encontra na fase de suporte; b) a fase da perna, que diz respeito ao tempo decorrido entre o início da fase de suporte e o contacto da perna com a superfície.

O ciclo de locomoção é demonstrado na Figura 6 (b) onde-se pode verificar a percentagem de locomoção de cada perna, LH significa traseira esquerda, LF dianteira esquerda, RF dianteira direita e RH traseira direita.

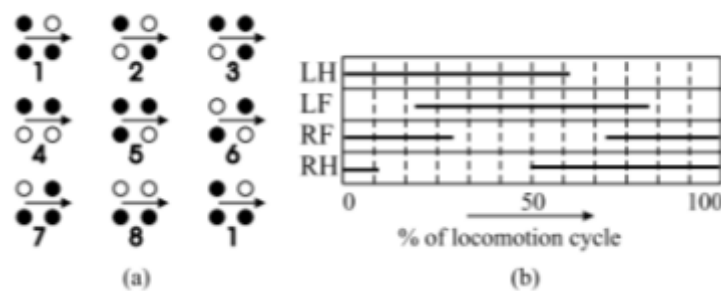


Figura 6 Diagrama da sequência de locomoção [5]

2.2.1. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO DE HEXÁPODES

O padrão de locomoção de animais invertebrados com exosqueleto rígido ocorre na mesma sequência, isto é, cada perna levanta quando a perna de trás está no chão, sendo que na

maior parte das vezes a sequência de movimentos ocorre da perna dianteira para a perna traseira. Wilson [5] comprovou que muitos dos padrões de locomoção implementados pelos insetos podem ser gerados através de uma variável, o tempo. Wilson concluiu que quando o inseto está em marcha lenta, possui um padrão de locomoção idêntico ao descrito anteriormente: assim que acelera a marcha, o seu padrão altera-se. Assim algumas pernas podem ser movidas ao mesmo tempo, sendo este padrão designado por trípole. Na Figura 7 pode visualizar-se esse comportamento.

De acordo com a teoria de Wilson, existem algumas regras que podem descrever o movimento dos insetos, tais como [5]:

- a movimentação das pernas, em relação ao corpo, ocorre da perna dianteira para a perna traseira. Nenhuma perna se movimenta enquanto a perna de apoio não está posicionada;
- as pernas do mesmo lado atuam de forma desfasada;
- o tempo de extensão das pernas é igual;
- o tempo de retração diminui à medida que a frequência dos passos aumenta.

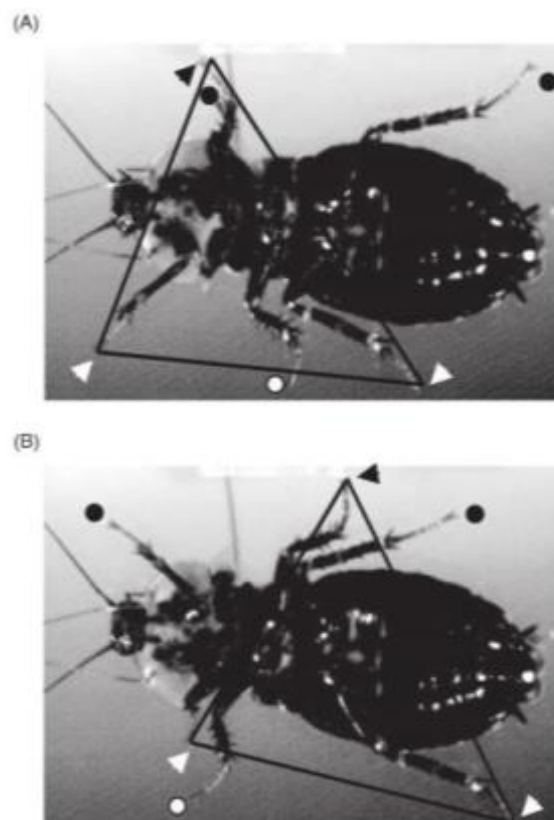


Figura 7 Fotografia de um inseto em marcha rápida [7].

Estas regras só se aplicam à locomoção do inseto em diante. Para outros casos, como por exemplo, subir paredes, estes movimentam duas pernas ao mesmo tempo ou só uma, dependendo da força necessária para poder suportar o seu peso.

2.2.2. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO DE QUADRÚPEDES

De todos os animais quadrúpedes o cavalo é o que está mais bem documentado em termos de locomoção. A locomoção dos quadrúpedes pode ser dividida em duas situações, simétrica e assimétrica. Na locomoção simétrica o movimento das pernas do par esquerdo ou direito é desfasada e ocorre durante um intervalo de tempo superior a metade de um ciclo [4].

Existem diferentes designações para a movimentação dos quadrúpedes, relativamente à locomoção simétrica: estas são andar, galope, galope curto, trote, etc. Andar é um tipo de movimentação lenta que possibilita aos animais uma grande estabilidade e como consequência estes armazenam pouca ou nenhuma energia elástica [4]. No trote a velocidade é mais elevada em relação à movimentação anterior, sendo que a maioria dos animais movimentam as pernas diagonalmente opostas e em conjunto, permanecendo no chão menos de metade no tempo do ciclo [4]. Na Tabela 1 e Tabela 2 é possível visualizar as características de diferentes padrões de locomoção de animais quadrúpedes, sendo β o fator de ocupação das pernas.

Tabela 1 Padrões de locomoção dos quadrúpedes a baixa velocidade [4].

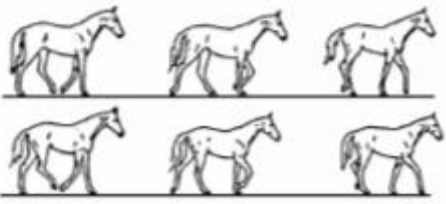

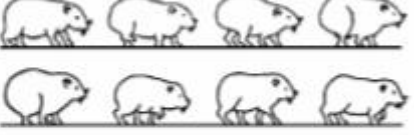
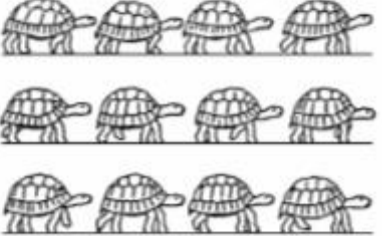






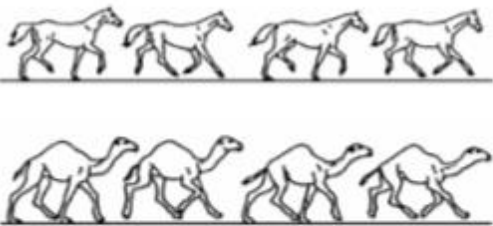


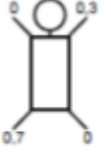
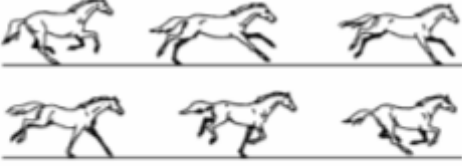
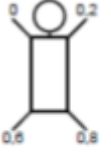
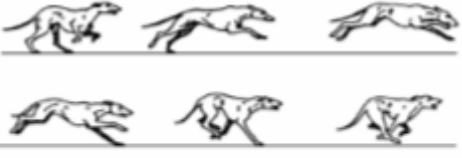



		Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
				Pernas	Suspensões	Batidas
Andar		 $\beta > 0,5$ (0,55-0,75 nos cavalos, 0,8 nos hamsters)	b & q	3, 4	0	4
						
Passo de Quelônio (similar nos outros pequenos tetrápodes)		 $\beta \approx 0,8$	q	2-4	0	2
Furta-Passo		 $\beta < 0,5$	b & q	1-3	0	4
						

Tabela 2 Padrões de locomoção dos quadrúpedes a média velocidade [4].

		Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
				Pernas	Suspensões	Batidas
Trote	 Maioria dos mamíferos, mas raro nos roedores, mustelídeos, alguns ungulados, etc.	 $\beta = 0,3-0,45$	q	0, 2	2	2
Passo ou Trote duro	 Camelos e cães de pernas compridas; genético ou treinado nos cavalos	 $\beta = 0,3-0,45$	q	0, 2	2	2

À medida que os animais quadrúpedes aumentam a sua velocidade, estes vão passar do trote para o galope. Este tipo de movimentação designa-se de padrão de locomoção assimétrico. A velocidade aumenta proporcionalmente com o aumento da frequência do ciclo, até atingir um determinado limite. Após este limite ser atingido, o aumento da velocidade é alcançado através do aumento da amplitude da passada. Nesta situação já ocorre um armazenamento de energia elástica. Na Tabela 3 podem-se ver as características de diferentes padrões de locomoção de animais quadrúpedes a alta velocidade e o correspondente fator de ocupação [4].

Tabela 3 Padrões de locomoção dos quadrúpedes a elevada velocidade [4].

		Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
				Pernas	Suspensões	Batidas
Galope leve ou Galope brando apresentado com a perna da esquerda a conduzir		 $\beta = 0,3-0,45$	q	0-3	1	3
Galope Transversal (por exemplo, nos cavalos) apresentado com a perna da esquerda a conduzir		 $\beta < 0,4$	q	0-2 (1 no galope muito rápido)	1	4
Rotativo (por exemplo, nos cães) apresentado com a perna da esquerda a conduzir		 $\beta < 0,4$	q	0-2	2	4
Meio-salto quadrúpedes (por exemplo, mustelídeos, roedores, lagomorfos)			q	0-3	1	3









2.2.3. PADRÕES DE LOCOMOÇÃO DE BÍPEDES.

Comparativamente aos padrões de locomoção dos quadrúpedes, o padrão dos bípedes possui apenas dois tipos de movimentos, andar ou correr. Alguns primatas conseguem suportar-se nos seus membros traseiros e poucos podem caminhar desta forma.

Quando um bípede está a andar, o tempo de suporte da perna no chão vai ser superior a 50% do tempo do ciclo. Quando este começa a correr o tempo de suporte da perna no chão

vai ser inferior a 50% do tempo de ciclo. Na Tabela 4 podem-se ver as características de alguns tipos de padrões de locomoção para bípedes assim como o fator de ocupação das pernas durante o ciclo.

Tabela 4 Exemplos de padrões de locomoção de bípedes [4].

		Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
				Pernas	Suspensões	Batidas
Meio - Salto		 $\beta = 0,1-0,3$	b	0-2	1	2
Salto		 $\beta = 0,1-0,3$	q	0, 2	1	2
bípedes (ou Pulo)		 $\beta = 0,2$	b	0, 2	1	1
Pronk		 $\beta = 0,2$	q	0, 4	1	1

3. ROBÔS DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

Nos últimos anos, tem sido relatado um enorme interesse no desenvolvimento de robôs inspirados em insetos. Tal deriva do facto de existir uma elevada quantidade de espécies de insetos, perfazendo aproximadamente dois terços de todas as espécies animais [8]. Estes, através do processo de evolução, têm vindo a adaptar-se a diversos tipos de ambientes.

A elevada diversidade dos insetos e a sua respetiva capacidade de adaptação permitiu-lhes adquirir diferentes tipos de aptidões de locomoção consideradas únicas, como por exemplo caminhar com seis patas, subir paredes, saltar e voar através do bater de asas. Os princípios destes comportamentos são considerados altamente eficientes e otimizados para sistemas em miniaturas. Logo, estes fornecem regras alternativas para o desenvolvimento da micro robótica.

Os robôs de inspiração biológica têm a capacidade de recriar, ou tentar recriar, os seus padrões de locomoção.

Neste capítulo apresentam-se alguns robôs que contêm diferentes tipos de locomoção e alguns robôs já existentes inspirados na biologia do Alfiate.

3.1. LOCOMOÇÃO ROBÓTICA

Na robótica móvel, existem vários tipos de locomoção. Estes devem levar a refletir sobre as diversas forças que vão interagir, que tipos de movimentos vão ser necessários e quais os atuadores fundamentais. De acordo com estes conceitos deve-se responder à pergunta: Como posso chegar ao meu destino?

A resposta a esta pergunta depende, então, de;

1. Estabilidade:
 - a. Número de pontos de contacto;
 - b. Centro de gravidade;
 - c. Estabilização estática/dinâmica;
 - d. Inclinação do terreno.
2. Características de contacto:
 - a. Pontos ou área de contacto;
 - b. Ângulo de contacto;
 - c. Atrito.
3. Tipo de ambiente:
 - a. Estrutura;
 - b. Meio de ambiente.

Tendo em conta estas características, pode começar-se a pensar no tipo de locomoção a ser adotado. Na Tabela 5 listam-se vários tipos de locomoção [9].

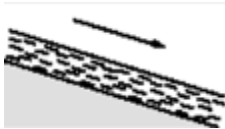




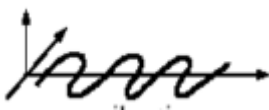






De seguida apresentam-se diversos tipos de robôs e a sua forma de movimentação.

3.1.1. ROBÔS COM MOVIMENTAÇÃO DESLIZANTE

Existem vários tipos de robôs criados com uma movimentação deslizante. São robôs criados para uma movimentação onde a existência de pernas se torna um obstáculo. Como exemplo, pode referir-se um cenário dentro de água, tubos de ar, etc.

Estes robôs têm a capacidade de imitar a locomoção das cobras. Na Figura 8 [10] é mostrado o robô ANNA KONDA, construído por um cientista da Noruega, chamado Oyvind Staydahl. Este robô é um protótipo com um comprimento de 3 metros, o seu peso é de 70 quilos e a sua fonte de energia é a pressão da água existente na mangueira que ele transporta, correspondente a 100 bar.

Tabela 5 Tipos de locomoção [9]

Tipo de movimento	Resistência ao movimento	Cinemática básica de movimento
<p>Fluxo num canal</p> 	Forças hidrodinâmicas	<p>Vórtice</p> 
<p>Rastejar</p> 	Forças de atrito	<p>Vibração longitudinal</p> 
<p>Deslizar</p> 	Forças de atrito	<p>Vibração transversal</p> 
<p>Correr</p> 	Perda de energia cinética	<p>Movimento oscilatório de um pêndulo de múltiplas ligações</p> 
<p>Saltar</p> 	Perda de energia cinética	<p>Movimento oscilatório de um pêndulo de múltiplas ligações</p> 
<p>Andar</p> 	Forças gravitacionais	<p>Girar de um polígono</p> 

A finalidade deste robô é ajudar os bombeiros no combate ao fogo, possibilitando a chegada de água ou espuma a sítios onde os bombeiros não podem ir sem colocarem a sua vida em risco.

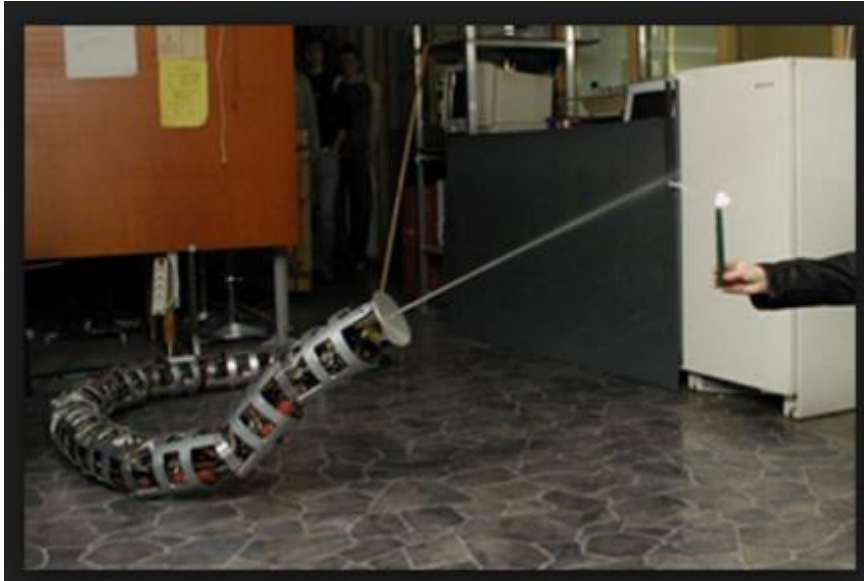


Figura 8 Robô ANNA KONDA [10].

3.1.2. ROBÔS COM MOVIMENTAÇÃO POR RODAS OU LAGARTAS

Nesta categoria existem vários tipos de robôs, sendo este o tipo de locomoção mais frequente na área da robótica móvel. Ao longo dos anos já foram efetuados muitos estudos, dando origem a variados progressos no tipo de atuadores.

Os veículos com rodas têm capacidade de se moverem de forma rápida, precisa e eficiente. No entanto, só se podem movimentar em dois eixos, os eixos X e Z , e o número de rodas depende do que o projetista tiver em mente. Um dos inconvenientes é necessitarem de uma superfície pavimentada, tornando incapaz de ultrapassar desníveis no terreno.

Os robôs com lagartas foram criados a pensar numa forma de ultrapassar pequenos desníveis no terreno, mas têm a desvantagem de necessitar de mais energia.

3.1.3. ROBÔS COM MOVIMENTAÇÃO UTILIZANDO PERNAS

Estes robôs apresentam mais vantagens do que os demonstrados anteriormente, utilizando um apoio isolado para cada perna, permitindo assim a sua movimentação num terreno desnivelado.

Um dos pontos mais importantes neste tipo de robôs para o projetista é a posição do seu centro de massa. Hoje em dia são utilizados giroscópios para poder detetar se o robô sofreu algum tipo de inclinação, permitindo assim poder corrigir a posição do corpo do robô e

estar sempre nivelado. Sendo assim, os robôs podem transportar cargas sem correr o risco de elas ficarem inclinadas.

Um dos robôs deste tipo mais conhecidos é o BigDog, um projeto militar desenvolvido pela Boston Dynamics. Este robô tem a capacidade de carregar mais de 180 kg. É possível ver a sua constituição na Figura 9.

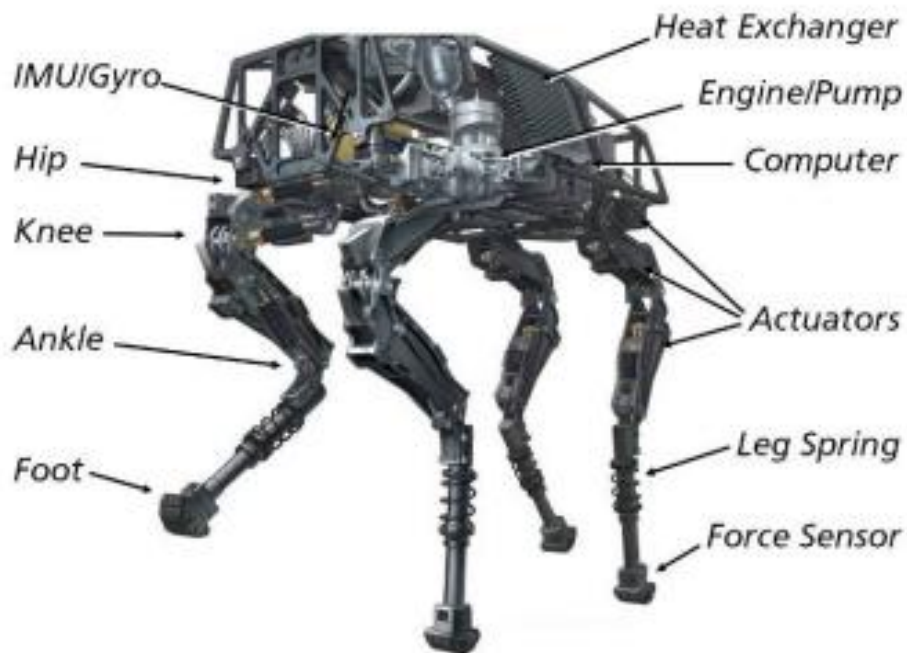


Figura 9 Robô BigDog [11].

Este tipo de robô utiliza uma locomoção inspirada em animais e o seu padrão de locomoção difere consoante a tarefa que o projetista desejar, se uma locomoção a andar ou a correr.

Porém estes robôs ficam limitados em termos de movimentos, ao tipo de atuadores. Assim pode-se criar um robô simples com uma programação mais acessível se se reduzir o número de atuadores.

3.2. ROBÔS DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA BASEADOS NO ALFAIATE

3.2.1. ROBÔ STRIDE [12]

O robô STRIDE foi desenvolvido em 2004, por uma equipa da universidade de Carnegie Mellon, Estados Unidos da América (EUA), constituída por Yun Seong Song e Metin Sitti. Este tipo de robô foi inspirado no inseto Alfaiate.

Tal como os insetos aquáticos, este robô reparte o seu peso de um grama sobre as suas seis patas revestidas com teflon, com uma espessura de 0,33 mm e um comprimento de 5 - 10 cm cada. Estas características permitem que o robô STRIDE utilize a tensão superficial da água para se movimentar, sem romper a superfície da água, como demonstra a Figura 10.

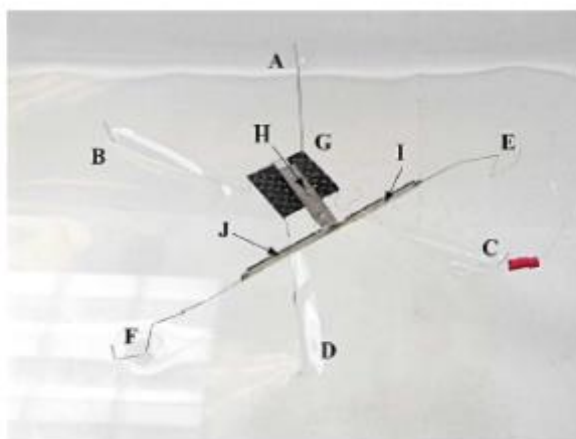


Figura 10 Protótipo do robô na superfície da água [12].

A equipa da Carnegie Mellon tentou aproximar a locomoção do robô à do inseto, utilizando para isso um atuador *unimorph*¹ e atuadores piezoelétricos². Ao colocar um unimorph no extremo de outro unimorph, é possível criar um movimento em duas dimensões. Na Figura 11 é possível verificar um mecanismo em forma de T composto por três atuadores *unimorph*, que são constituídos por elementos piezoelétricos. Ao ligar os atuadores das pernas aos atuadores das extremidades laterais, consegue-se criar o movimento paralelo necessário, para a sua movimentação em duas dimensões [12].

¹ Braço de suporte composto por uma camada ativa e uma camada inativa.

² Capacidade de alguns cristais gerar tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica.

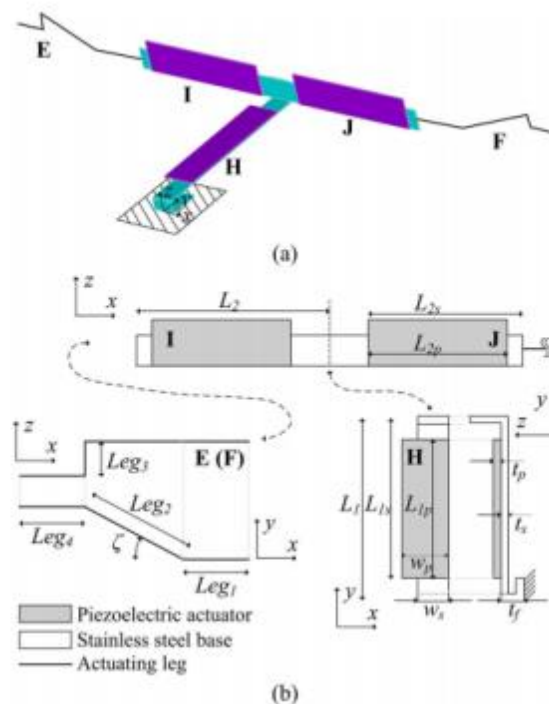


Figura 11 Esquema do mecanismo em forma de T (a) e representação de I e J como atuadores colaterais (b) [12].

Apesar da aproximação do movimento do robô ao do inseto verdadeiro, ainda existe uma diferença na velocidade. O STRIDE consegue avançar a uma velocidade de 3 cm/s, em linha reta, com 40 batimentos de patas por segundo. Por outro lado, o inseto Alfaiate pode alcançar uma velocidade de 1,5 m/s, com 10 batimentos por segundo. Tal pode ser explicado devido ao peso do robô ser superior e ao menor peso que cada pata pode suportar. Uma pata do inseto pode suportar até 15 vezes o peso total do inseto, enquanto a pata do robô só pode suportar metade do conjunto do mecanismo.

Os autores esperam aperfeiçoar o robô neste sentido, em estudos posteriores, utilizando para tal diferentes tipos de atuadores como por exemplo micromotores com uma placa eletrônica.

3.2.2. ROBÔ WATER DANCE [13]

O robô Water Dance foi o primeiro micro robô a conjugar a capacidade de andar sobre a água, tal como o Alfaiate, com a capacidade de saltar continuamente na vertical, podendo assim evitar obstáculos em missões de reconhecimento.

O Water Dance é constituído por três pernas de apoio e por duas pernas de movimentação (ver Figura 12). Este consegue saltar cerca de 14 cm de altura e 35 cm de comprimento em cada salto, com uma velocidade de 1,6 m/s, sendo o seu peso de 11 gramas. As suas patas são constituídas por uma espuma de níquel hidrofóbica. O robô possui um sistema de atuação no qual utiliza um motor de corrente contínua e um grupo de engrenagens redutoras.

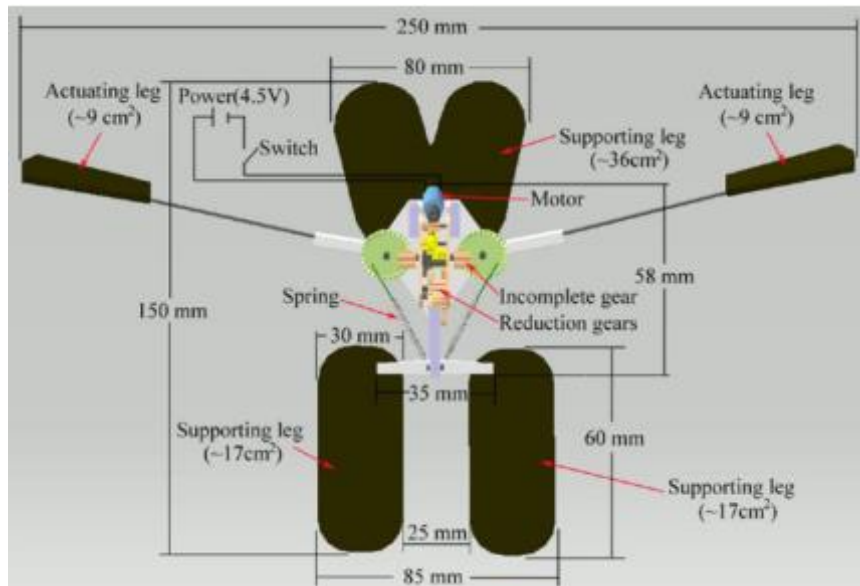


Figura 12 Esquema do Water Dance ilustrando todo o seu conteúdo [13].

Para se elevar da superfície, o robô teria de superar todo o seu peso, assim como todas as forças que contrariam o seu movimento. O investigador Jie Zhao concluiu que a força necessária para que o robô se possa elevar podia ser expressa em termos de tensão superficial, pressão hidrostática e pressão hidrodinâmica. A força da viscosidade foi desprezada por ser muito menor que a da pressão hidrodinâmica.

Embora existam muitos robôs com a capacidade de imitar o Alfiate, quer em movimentos horizontais, quer em movimentos verticais, este foi o primeiro a conseguir efetuar os dois.

3.2.3. ROBÔ WATER DANCE II-A [14]

O robô Water Dance II-A foi desenvolvido pelos mesmos criadores do robô Water Dance da universidade Carnegie Mellon, nos EUA. O robô anterior só tinha a capacidade de seguir em frente, não podendo ser controlado.

Neste trabalho foi criado um robô que não utiliza qualquer alimentação externa, e que utiliza dois motores elétricos para movimentar as dozes patas, utilizando duas pilhas do tipo botão para a alimentação. Outras características específicas deste robô são o facto de possuir velocidade variável e conseguir inverter a sua direção através da ordem do comando remoto por infravermelhos.

O corpo do Water Dance II-A (Figura 13) é dividido em duas camadas: a camada de base (constituída por uma folha de madeira), que suporta o corpo do robô, e a camada elétrica, que está colada à base. À camada elétrica está colada uma pilha do tipo botão e os motores de corrente contínua (DC). As pernas estão igualmente distribuídas pelas laterais da base. Todo os componentes foram dispostos de forma simétrica de modo ao seu centro de gravidade se situar no meio.

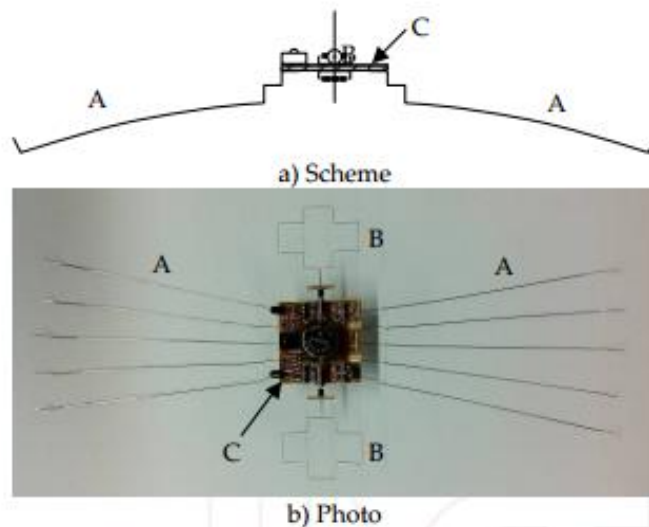


Figura 13 Esquema e foto do robô Dancer II-a: A - dez pernas de suporte; B - duas pernas de direção; C - corpo com uma placa base, uma placa elétrica, duas baterias no suporte e dois motores DC [14].

A movimentação do robô é comandada através do comando de infravermelhos. Este possui apenas quatro botões, que controlam a movimentação do robô para quatro direções; no entanto, para aumentar a velocidade basta carregar duas vezes seguidas e rápidas no mesmo botão.

Este robô obteve uma melhor avaliação nos testes laboratoriais do que o anterior, o Water Dance. Como consequência, os investigadores responsáveis pelo projeto querem aplicar

este sistema ao do Water Dance, tendo como objetivo criar um robô melhor, juntando os melhores atributos dos dois robôs.

3.2.4. ROBÔ ROBOSTRIDER [2]

O robô Robostrider foi criado com o objetivo de explicar a locomoção do inseto Alfaiate. Os investigadores utilizaram uma câmara de vídeo que consegue captar imagens a uma velocidade de 500 *frames* por segundo. Desta forma conseguiram compreender a movimentação do inseto, revelando que este transfere momentaneamente a sua força para a água, através dos vórtices criados pelas suas pernas e não através das ondas capilares, como esperado.

Este robô tem um comprimento de 9 cm e pesa 0,35 g, sendo as proporções consistentes com o seu homólogo animal. As suas pernas são compostas por um fio de 0,2 mm de aço inoxidável e o seu corpo é composto por alumínio leve. A sua força advém de um elástico que percorre todo o seu corpo, e que está acoplado às suas pernas de movimento. Na Figura 14 é possível observar o robô Robostrider.



Figura 14 ROBOSTRIDER em comparação com o inseto Alfaiate [2].

Durante o desenvolvimento deste, os investigadores tiveram o desafio de construir um dispositivo autossuficiente, e extremamente leve para que o seu peso e movimento não quebrassem a tensão de superfície da água. Um importante critério a ter em conta é que a força de cada perna não exceda duas vezes a tensão de superfície da água. Para tal, a solução encontrada para o movimento foi a utilização da força elástica. Desta forma é possível garantir que o Robostrider não quebre a superfície da água, conseguindo ainda criar ondas e vórtices através do seu movimento, como o Alfaiate.

4. ARQUITETURA E MÓDULOS UTILIZADOS

Este projeto consiste na implementação de um robô com a capacidade de andar sobre a superfície da água inspirado no inseto Alfiate. Para tal, foi necessário realizar vários estudos de forma a garantir o melhor padrão de locomoção e uma estabilidade segura.

Foi igualmente necessário proceder a modificações em termos de estrutura do robô hexápode existente, assim como analisar o material mais adequado para a sua flutuabilidade na água.

Em termos de *hardware* utilizou-se um micro controlador recente, pertencente ao *kit* de desenvolvimento STM32F429IDISCOVERY. Este microcontrolador comunica com o Mini SSC II já existente no robô através do protocolo RS-232. Utilizou-se ainda um giroscópio para permitir ao robô equilibrar-se no caso de operação sobre águas turbulentas.

Para fazer o robô seguir um objeto ou desviar-se de obstáculos utilizou-se uma placa de infravermelhos, com dois emissores e um recetor; desta forma o robô consegue corrigir a sua direção se necessário. Todos estes módulos são alimentados por uma bateria de modo a tornar o robô autónomo.

Na Figura 15 pode-se visualizar um diagrama de blocos relativo ao funcionamento do robô e no Anexo A encontra-se um esquema de ligações com as conexões do *hardware*.

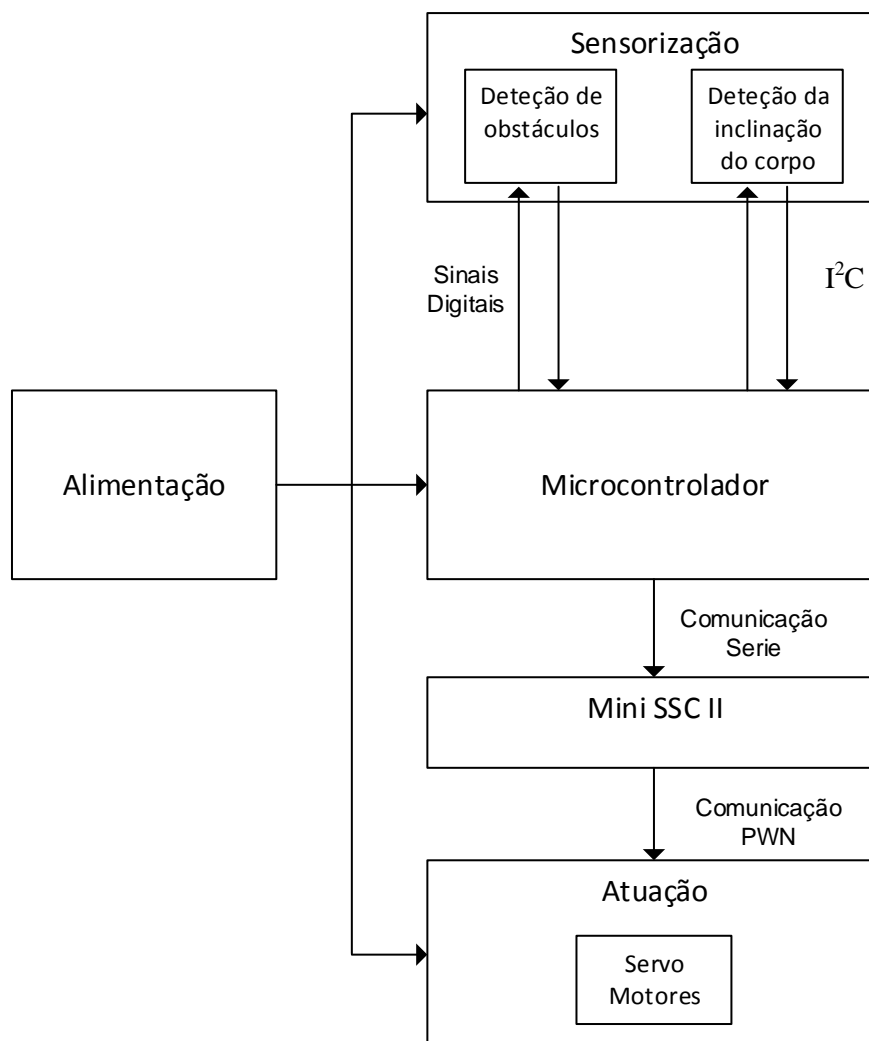


Figura 15 Arquitetura geral de funcionamento do robô.

4.1. ROBÔ HEXÁPODE

Este projeto foi baseado num robô hexápode, desenvolvido pela Lynxmotion, que tinha a capacidade de andar sobre a terra; este *kit* continha vários módulos programáveis que permitiam ao utilizador alterar a sua locomoção.

A estrutura do robô foi aproveitada na sua totalidade, uma vez que os graus de liberdade que apresentava na movimentação das suas pernas eram suficientes para a realização deste projeto, sendo cada perna constituída por dois servomotores como demonstra a Figura 16. Pode-se visualizar ainda, na Figura 17, a estrutura do robô depois de terem sido retirados todos os componentes, exceto os servomotores.

Inicialmente o robô era composto por um controlador BASIC Stamp, um *display* de duas linhas por dezasseis caracteres, um módulo de infravermelhos, dois controladores de servomotores e doze servomotores. Para a realização deste trabalho foram retirados alguns componentes. Destaca-se a remoção do *display* e o controlador BASIC Stamp, devido ao facto da sua linguagem de programação estar desatualizada.

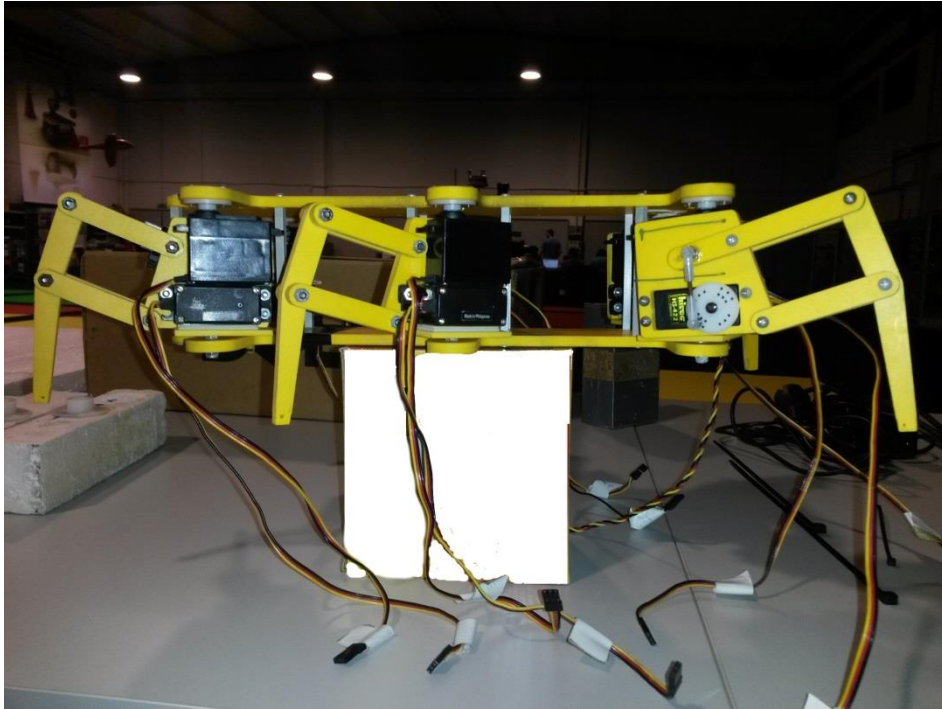


Figura 16 Estrutura inicial do robô vista de lado.

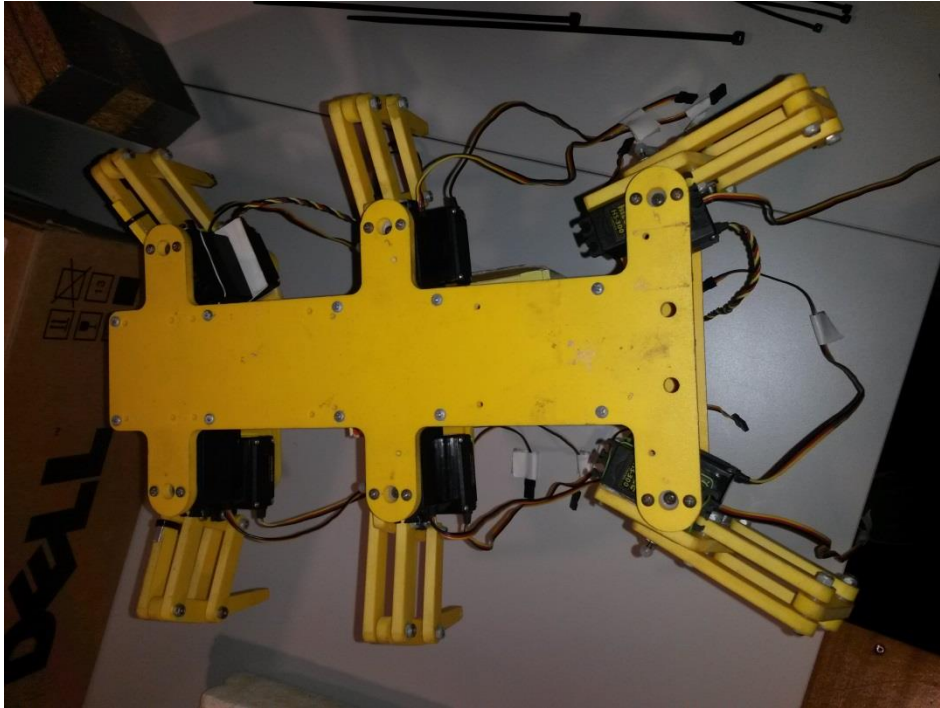


Figura 17 Estrutura inicial do robô vista de cima.

4.2. MINI SSC II SERIAL SERVO CONTROLLER [15]

A placa Mini SSC II é um módulo eletrônico que permite controlar até 8 servo motores, utilizando uma comunicação série com uma taxa de transmissão que pode ser de 2400 bps ou de 9600 bps. Esta placa tem a vantagem de permitir ser acoplada a outras 31 placas do mesmo tipo, permitindo assim utilizar uma única linha de comunicação para controlar até 255 servo motores simultaneamente.

Na Figura 18 pode-se visualizar a placa e verificar as ligações de alimentação, dos servos motores, de comunicação e os *jumpers* de configuração.

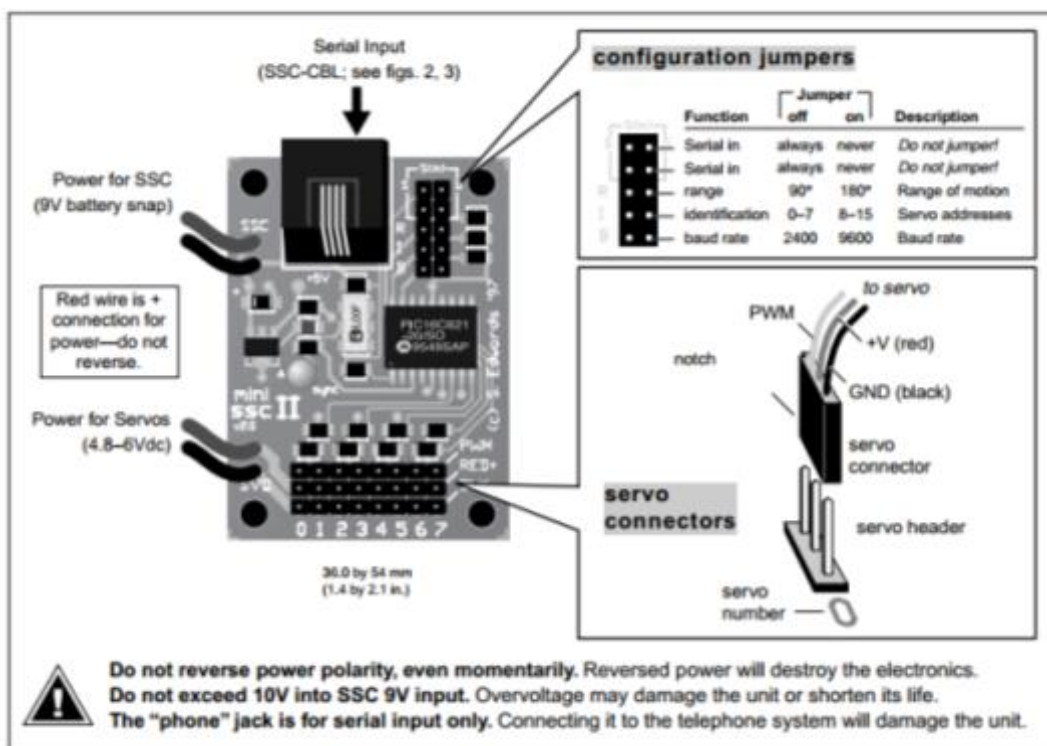


Figura 18 Descrição da placa Mini SSC II [15].

4.2.1. CONFIGURAÇÃO DA PLACA MINI SSC II

Quando todos os *jumpers* da placa Mini SSC II são removidos, a sua configuração impõe uma taxa de transmissão de 2600 bps, os endereços dos servo motores estão entre 0 - 7, e a amplitude do movimento de cada servomotor varia na gama de 0 - 90°.

Para se modificarem as configurações, é necessário colocar os *jumpers* num local da preferência do utilizador, como demonstra a Figura 18. Pode verificar-se que para cada conector é definida uma letra, sendo que a letra R diz respeito à amplitude do movimento, a letra I ao endereço dos servo motores e a letra B refere-se à taxa de transmissão, de acordo com:

- Movimentação – sem a colocação do *jumper* no conector da letra R, é permitido aos servos movimentarem-se entre 0-90°, sendo que cada unidade de posicionamento corresponde a 0,36°. Colocando o *jumper*, permite-se uma movimentação entre 0-180°, em que cada unidade corresponde, neste caso, a 0,72°, sendo necessário verificar se o servo motor tem capacidades de uma movimentação até 90° ou 180°.

- Endereço – sem a colocação do *jumper*, o endereço pode variar entre 0-7, sendo que com o *jumper* varia entre 8-15. Se forem interligadas mais placas Mini SSC II entre si, é necessário ter em conta que cada placa adicionada corresponde a 8 endereços adicionais.
- Taxa de transmissão – sem o *jumper* a taxa de transmissão é de 2400 bps, e com o *jumper* é de 9600 bps. Em qualquer dos casos a transmissão é feita através de dados de 8 bits, sem paridade, e 1 bit de *stop*.

4.2.2. LIGAÇÕES ELÉTRICAS

A alimentação da placa pode variar entre 7 V e 15 V.

As ligações dos servos são efetuadas através de fichas normalizadas de 3 condutores. A Figura 18 exemplifica o processo de colocação da ficha. A alimentação deve ser efetuada usando o fio vermelho (+) e preto (–), utilizando uma tensão entre 4,8 V e 6 V.

A ligação série requer apenas duas conexões: o sinal de transmissão de dados e o sinal de GND. A placa possui 4 pinos, 2 para a entrada de dados e 2 para o sinal de GND. Isto permite utilizar um único sinal para controlar várias placas. A Figura 19 mostra como são efetuadas as ligações numa ficha de 9 pinos.

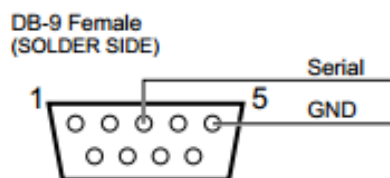


Figura 19 Esquema de ligações da porta RS232 [15].

4.2.3. PROGRAMAÇÃO

A programação da placa Mini SSC II é simples, sendo necessário o envio de 3 bytes separadamente. O primeiro vai permitir o sincronismo com a placa, o segundo serve para escolher o servo a ser utilizado e o último permite escolher a posição do servo motor.

Byte 1	Byte 2	Byte 3
[sync marker (255)]	[servo # (0-254)]	[position (0-254)]

Figura 20 Gama de valores a enviar em cada byte [15].

4.3. SERVOMOTOR HITEC HS-300

Os servomotores são motores elétricos realimentados que permitem um controlo sobre a sua posição. São constituídos basicamente por um motor de corrente contínua, um conjunto de engrenagens e um circuito eletrónico de controlo. Por norma possuem movimentos angulares entre 0° e 90° ou 0° e 180°.

O circuito eletrónico consiste num bloco de engrenagens e num potenciómetro que vai permitir fazer correções ao deslocamento do motor, através de uma realimentação do sinal.

Na Figura 21 pode-se ver a imagem do servomotor utilizado, e na Figura 22 o diagrama de blocos de um servo motor.



Figura 21 Servomotor Hitec HS-300 [16]

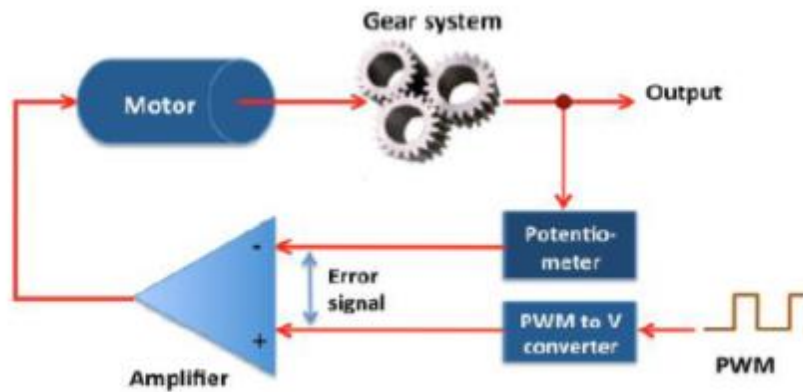


Figura 22 Diagrama de blocos de um servomotor [17].

A sua alimentação é feita por três condutores, sendo o condutor preto ligado a GND e o vermelho a 5 V. O condutor amarelo é alimentado através de um sinal *Pulse-Width Modulation* (PWM), que consiste numa onda quadrada em que se varia a duração do estado lógico “1”, mantendo o mesmo período de tempo (cada impulso deve ser gerado a cada 20 milissegundos), como se mostra na Figura 23. Na generalidade, no caso de um servomotor com uma amplitude de movimento entre 0° e 180°, apresentam a seguinte correspondência aos tempos [17]:

- 1 ms, roda no sentido anti-horário, até chegar aos 0°;
- 1,5 ms, roda até chegar aos 90°;
- 2 ms, roda no sentido horário, até chegar aos 180°.

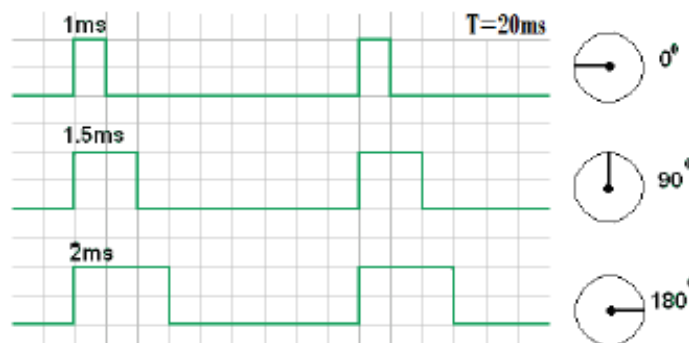


Figura 23 Descrição do sinal aplicado a um servomotor [17].

As características principais dos servomotores utilizados são [16]:

- Tensão de operação: 4,8 V a 6 V;
- Binário: 3,02 kg/cm (4,8 V) a 3,67 kg/cm (6 V);
- Velocidade: 0,19 sec/60° a 0,15 sec/60°;

- Peso: 47,1 g;
- Corrente consumida quando parado: 8 mA (4,8 V) a 8,8 mA (6 V);
- Corrente consumida em movimento: 150 mA (4,8 V) a 180 mA (6 V);
- Dimensões: 40,6 mm de comprimento, 20,3 mm de largura e 35,6 mm de altura.

Neste projeto foram utilizados mais dois servomotores diferentes, mas com as mesmas características, para substituir servomotores danificados durante a realização do projeto. Estes são o HITEC HS5646MG e o HITEC HS422.

4.4. LYNXMOTION IRPD-01 VER 5.0. [18]

O Infra Red Proximity Detector (IRPD-01) é um módulo eletrônico de um sensor de infravermelhos, que permite detetar a presença de objetos. Este sensor utiliza dois LED emissores e um LED recetor. O sinal do recetor é um sinal modulado, assumindo valores fixos de 0 - 5 V, sendo incapaz de fazer uma medição da proximidade do objeto detetado. Na Figura 24 é apresentada uma imagem da placa.

O sinal de saída do módulo é, por omissão, o estado lógico HIGH. Quando é detetado algum objeto o sinal comuta para o estado lógico LOW. Para ser feita a deteção do objeto, é necessário ligar os sensores emissores e verificar o sinal do recetor. Na Tabela 6 pode verificar-se a resposta do recetor.

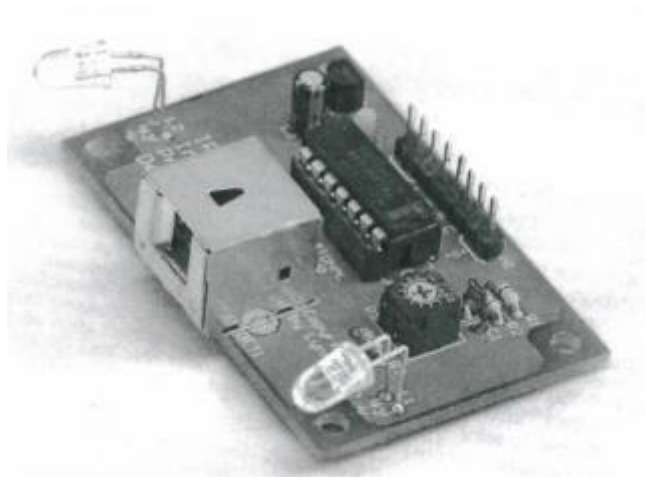


Figura 24 Módulo IRPD – 01 da Lynxmotion [15].

Tabela 6 Tabela de verdade do sensor IRPD [18].

IRPD I/O pins	Não é aconselhável	Com Obstáculo			Sem Obstáculo		
Sensor esquerdo	HIGH	LOW	HIGH	LOW	LOW	HIGH	LOW
Sensor direito	HIGH	LOW	LOW	HIGH	LOW	LOW	HIGH
Detetor IR	-	HIGH	LOW	LOW	HIGH	HIGH	HIGH

Na Figura 25 apresenta-se graficamente o alcance desta placa para cada um dos sensores.

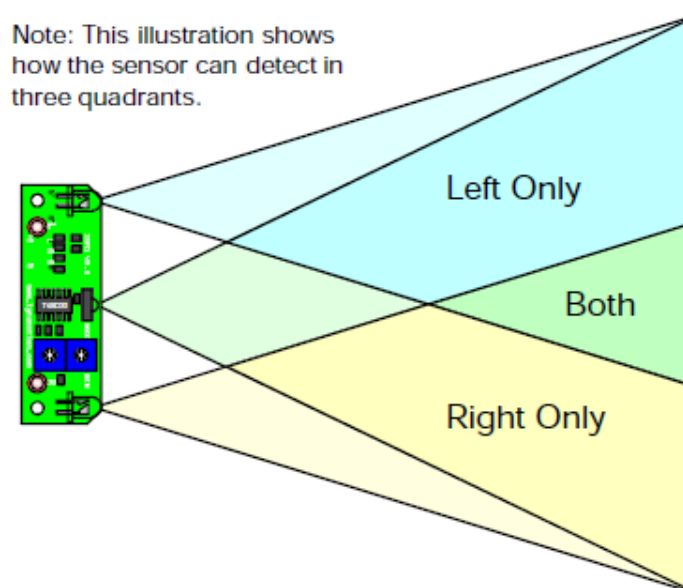


Figura 25 Ilustração do alcance do sensor IRPD [18].

4.4.1. LIGAÇÕES

O sensor de proximidade é constituído por cinco conexões: GND, a alimentação de 5 V, a saída do sinal do recetor e as duas entradas de ativação dos emissores.

4.4.2. PROGRAMAÇÃO

A aplicação desenvolvida verifica o estado lógico do emissor direito e esquerdo de forma separada, para poder-se saber de que lado está o objeto, sendo necessário criar duas variáveis temporárias para guardar o resultado. Após ativar um emissor é necessário fazer uma pausa de um milissegundo para a leitura do recetor. Depois de guardar o sinal do

recetor, desativa-se o emissor e ativa-se o outro. Este processo deve ser repetido sempre que for necessário efetuar uma leitura.

4.5. STM32 DISCOVERY

4.5.1. *HARDWARE*

O STM32F429IDISCOVERY é um *kit* que contém diversos componentes ligados entre si na forma de uma placa de desenvolvimento de programação simples. Disponibiliza uma ferramenta de depuração chamada ST-LINK/V2, um ecrã tátil, uma memória externa de 64 Mbits, um giroscópio ST *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS), dois botões e seis LED. A Figura 26 [18] apresenta uma imagem da placa.

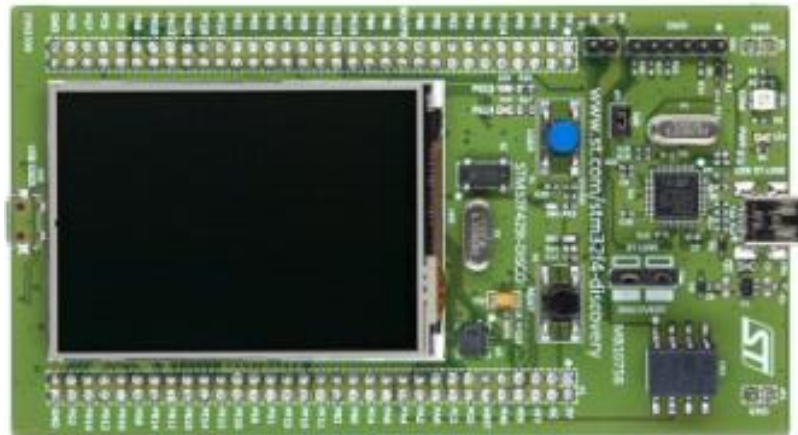


Figura 26 Placa STM32F429IDISCOVERY [19].

Apesar do seu alto desempenho a placa consome cerca de 260 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ a uma frequência de 180 MHz. Na Figura 27 pode-se ver o diagrama de blocos dos principais constituintes da placa.

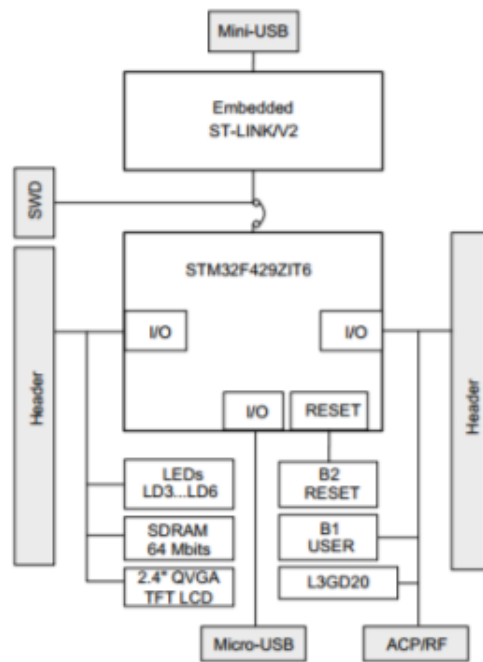


Figura 27 Diagrama de blocos da placa STM32F429IDISCOVERY [19].

As principais características da placa são:

1. Microcontrolador STM32F429ZIT6 com 2 Mb de memória Flash, 256 Mb de RAM num *package* LQFP144;
2. ST-LINK/V2 incorporado na placa, que permite utilizar o microcontrolador como *kit* ou sozinho através da colocação de um *jumper* (contém um conector SWD para programar e efetuar a depuração);
3. Alimentação pode ser feita através de *Universal Serial Bus* (USB) ou por fonte externa de 3 V ou 5 V;
4. 2.4"QVGA *Thin-Film Transistor* (TFT) *Liquid Crystal Display* (LCD);
5. Sensor de movimento L3GD20, ST MEMS, com três eixos de saída digital;
6. Seis LED:
 - a. LD1 (vermelho/verde) para a comunicação através de USB;
 - b. LD2 (vermelho) para a alimentação a 3 V;
 - c. LD3 (verde) e LD4 (vermelho) para utilização do utilizador;
 - d. LD5 (verde) e LD6 (vermelho) para comunicação através de USB *On-the-Go*;
7. 2 Botões (o do *user* e do *reset*).

4.5.2. FERRAMENTA DE DESENVOLVIMENTO PARA STM32

O *kit* STM32F429IDISCOVERY dispõe de várias aplicações de *software* aconselháveis pela própria empresa que os fabrica; deste modo fica mais fácil a obtenção de um *software* compatível com a placa em termos de *firmware*. Algumas destas soluções são comerciais, com tempo de uso limite ou limite de linhas de código, outras são *open-source*. Na lista abaixo estão alguns exemplos dessas aplicações de *software*:

- IAR EWARM;
- KEIL MDK;
- Atollic TrueStudio;
- Rowley CrossWorks;
- Raisonan Ride;
- Embest Coocox;
- SEGGER emIDE;
- Yagarto.

A ferramenta de desenvolvimento escolhida foi a Atollic TrueStudio, sendo a sua principal limitação o número máximo de linhas de código permitidas. No entanto, tem como principal vantagem o facto de, através da simples escolha do microcontrolador a ser utilizado, incluir todas as bibliotecas necessárias e efetuar automaticamente a sua configuração. A Figura 28 apresenta uma imagem da interface gráfica do Atollic TrueStudio [20].

A linguagem para codificação das instruções a serem executadas no *software* é a linguagem C.

4.5.3. GIROSCÓPIO

O giroscópio mede as forças envolvidas na movimentação da placa. Este não é capaz de identificar se o aparelho se encontra inclinado, no entanto, quando ocorre uma movimentação rotacional nos eixos *X*, *Y* e *Z*, é capaz de reconhecer a direção da movimentação e a sua velocidade uma vez que o seu princípio se baseia na inércia.

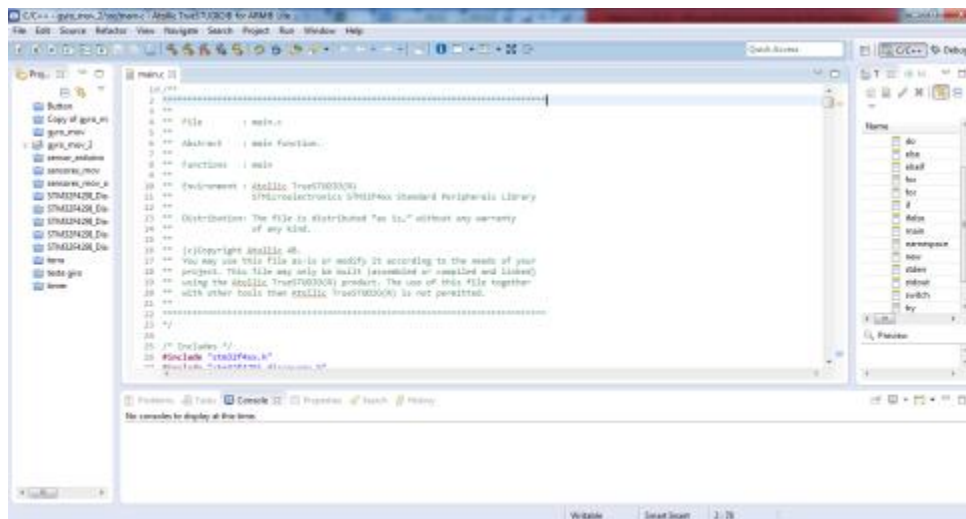


Figura 28 Ambiente gráfico do Atollic TrueStudio.

A Figura 29 demonstra um exemplo de um giroscópio mecânico, no centro do giroscópio existe um rotor (uma roda que vai girar em torno do seu eixo), que está disposto de modo a que este possa girar em torno de qualquer um dos eixos, tomando assim qualquer posição no espaço. Para tal, são utilizados dois balancins³, um interno e um externo.

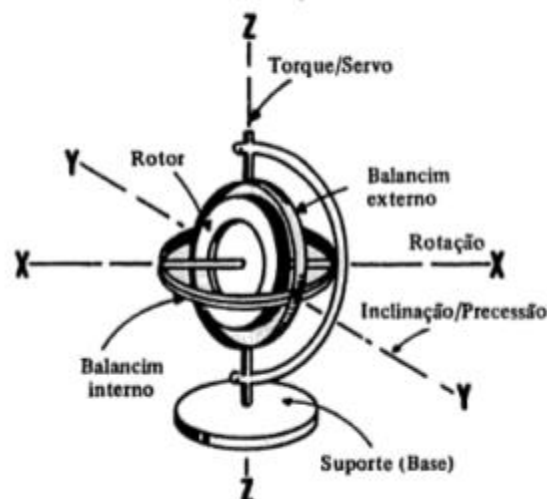


Figura 29 Composição de um giroscópio básico [21].

A força da gravidade é uma força que vai atuar sobre todos os componentes do giroscópio, provocando o seu equilíbrio estático e uma certa rigidez em relação à movimentação.

³ Peça de metal que tem um movimento oscilatório destinado a transmitir outro movimento.

Quando uma força é aplicada no sentido de mudar o plano de rotação, o giroscópio responde como se fosse aplicada uma força exatamente a 90° da força de origem do movimento. Este movimento vai produzir uma rotação cônica chamada de precessão.

O binário permite avaliar a velocidade do seu movimento e, juntamente com as variáveis de direção, permite estimar a velocidade angular.

4.5.4. L3GD20 [22]

A placa STM32F429IDISCOVERY contém um componente com as capacidades de um giroscópio (ver Figura 30), sendo um sensor com três eixos.

As configurações da sua resolução são $\pm 250^\circ/\text{s}$ a $\pm 500^\circ/\text{s}$ ou $\pm 2000^\circ/\text{s}$ podendo ser lidas através de interfaces *Serial Peripheral Interface* (SPI) ou *Inter-Integrated Circuit* (I²C). A tensão para a sua alimentação está entre 2,4 V a 3,6 V.

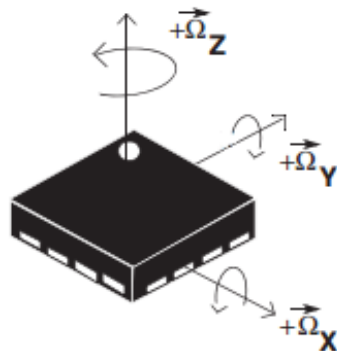


Figura 30 Vista de topo do componente L3GD20 [22].

O giroscópio inclui um sensor de medição e um circuito integrado capaz de providenciar a velocidade angular medida através da interface I²C.

4.6. ALIMENTAÇÃO

O robô é constituído por três blocos principais a serem alimentados: o micro controlador STM32F4DISCOVERY (5 V), os servomotores (4,8 V a 6 V) e a placa Mini SSC II, sendo todos alimentados por uma bateria de 11,1 V, como se pode ver no diagrama na Figura 31.

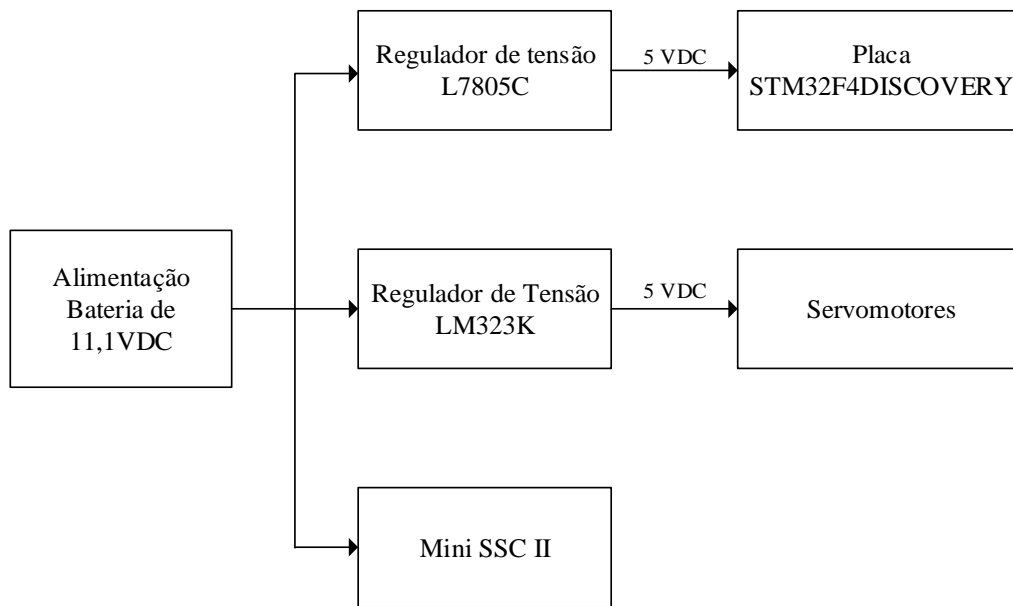


Figura 31 Diagrama de blocos do sistema de alimentação.

A escolha desta bateria deve-se ao consumo dos servomotores: quando o robô está ligado, os servomotores chegam a ter um consumo de 2,2 A. A bateria mais adequada para este trabalho, devido ao peso e consumo foi uma bateria do tipo *Lithium Polymer* (LiPo), com três células, uma carga elétrica de 2170 mAh, uma tensão de 11,1 V e capacidade de descarga de 25C contínuos.

No caso desta bateria é preciso ter um cuidado especial devido a ser uma bateria que pode incendiar-se muito facilmente. A bateria LiPo tem os seus eletrólitos de sais de lítio retidos num polímero sólido, como o óxido de poliácrlonitrilo, em vez de solventes, tornando-as adaptáveis a diferentes formatos e permitindo altas taxas de descarga.

Os cuidados a ter com este tipo de bateria são:

- Usar carregadores específicos para esta bateria;
- Evitar o aquecimento da bateria - quando a bateria aquece muito, ela incendeia-se;
- Não deixar a bateria descarregar até menos de 3 V por célula;
- Durante a carga não permitir que ultrapasse os 4,25 V por célula;
- Sempre que possível usar o balanceador.

Como a bateria usada é de 11,1 V, foi necessário aplicar um regulador de tensão de 5 V à entrada da placa para a alimenta-la; neste caso optou-se pelo componente LM7805 [23]. A alimentação dos servos é constituída por um regulador de tensão diferente do anterior

devido ao seu consumo de corrente e há possibilidade de haver ruído eletrónico provocado pelos servomotores e interferir com a placa; para este caso optou-se pelo componente LM323K [24]. Os esquemáticos das ligações dos circuitos encontram-se no Anexo A.

5. IMPLEMENTAÇÃO DO ROBÔ

Neste capítulo descrevem-se as principais características do *software* desenvolvido para o robô hexápode, assim como as alterações efetuadas na sua estrutura física de forma a aproximar a locomoção à do inseto Alfaiate.

5.1. ESTRUTURA

O robô hexápode usado como plataforma base tinha sido inicialmente construído para ter uma locomoção terrestre. Por este motivo foi necessário proceder a alterações nas extremidades das suas pernas para que conseguisse andar sobre a água. Para compreender o tipo de material a ser utilizado para que o robô conseguisse sustentar-se sobre a água foi feito um estudo sobre a estática de fluidos, que se apresenta de seguida.

5.1.1. ESTÁTICA DE FLUÍDOS

A estática de fluidos, ou “Hidrostatica”, enquadra-se na área da mecânica, dedicando-se ao estudo dos fluidos em equilíbrio. O conceito de fluido é utilizado para descrever uma substância que se encontra em movimento por oposição às forças externas aplicadas. Assim se explica o comportamento dos líquidos e dos gases. Os líquidos não têm forma

própria, sendo capazes de alterar de forma pouco significativa o seu volume quando sujeitos a uma elevada temperatura e pressão, enquanto uma determinada massa de gás tem tendência a ocupar todo o volume que lhe é fornecido, numa propriedade conhecida com “expansibilidade”.

5.1.1.1. DENSIDADE

Quando é fixada uma temperatura e uma pressão a uma substância, pode-se verificar que existe nessa substância uma relação proporcional entre a sua massa e o seu volume. A essa relação chama-se densidade. O seu símbolo é a letra Grega ρ , e a sua unidade no sistema internacional é quilograma por metro cúbico (kg/m^3).

Exemplificando, considerem-se as massas m_1, m_2, \dots, m_n , de uma dada substância, submetidas a uma pressão e temperatura constantes. Assim, representado os seus respetivos volumes por, V_1, V_2, \dots, V_n , verifica-se que:

$$\frac{m_1}{V_1} = \frac{m_2}{V_2} = \dots = \frac{m_n}{V_n} = \rho \text{ (constante)} \quad (1)$$

Na Tabela 7 apresentam-se as densidades de vários tipos de materiais, à temperatura ambiente:

Tabela 7 Densidade de diferentes tipos de materiais.

Material	Densidade (kg/m^3)
Alumínio	2700
Latão	8600
Cobre	8900
Ouro	19300
Gelo	920
Ferro	7800
Chumbo	11300
Prata	10500
Aço	7800
Água	1000
Cortiça	240
Esferovite	15

Analisando a Tabela 7 e a equação (1), pode-se afirmar que quanto maior a massa e menor o volume que a substância ocupa, maior vai ser a sua densidade.

5.1.1.2. LEI DE ARQUIMEDES

Arquimedes foi um físico e matemático grego, que viveu em Siracusa, sendo considerado como um dos principais cientistas da antiguidade clássica. Das muitas contribuições ao mundo da física, destacam-se as fundações da hidrostática e da estática, tendo descoberto a lei do impulso, também designada por lei de Arquimedes.

Imagine-se uma situação em que se está a pesar um objeto, como uma pedra, que está submersa num tanque. Se se utilizar um dinamómetro para a verificação do seu peso, verificar-se-á que a pedra pesa menos dentro de água, do que fora da água. A água vai exercer uma força vertical com direção ascendente, que vai suportar parte do peso da pedra. Pode-se verificar melhor este fenómeno se em vez da pedra se utilizar um objeto de menor densidade, como um cubo de cortiça, que flutua tendo parte do seu corpo submersa em água e outra parte fora da água. Na Figura 32 pode-se ver um exemplo do que acaba de ser exposto.

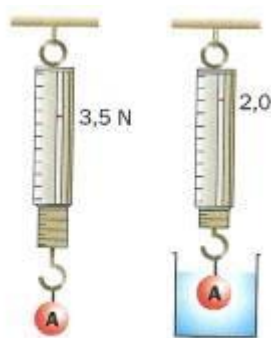


Figura 32 Demonstração da diferença de peso dentro e fora da água [25].

A força exercida pela água na rolha é chamada força de impulsão. Neste caso, a rolha vai flutuar porque a força da impulsão vai ser superior à força do seu peso. Esta força depende da densidade e do volume do objeto, mas não do seu formato.

Segundo o princípio de Arquimedes, um corpo totalmente ou parcialmente submerso é impulsionado por uma força igual ao peso do líquido deslocado. A sua expressão física é:

$$\vec{I} = (\rho_{\text{liquido}} - \rho_{\text{objeto}}) \times V \times g \quad (2)$$

Onde \vec{I} é a força da impulsão, $\rho_{liquido}$ a densidade do líquido, ρ_{objeto} a densidade do objeto mergulhado no líquido, V o volume submerso no líquido (o volume submerso no líquido é igual ao volume de líquido deslocado) e g a constante da aceleração da gravidade [26].

A força da impulsão ocorre devido ao facto da força de pressão do líquido ser maior na parte inferior do que na parte superior do líquido. Se a densidade do objeto for maior que a densidade do líquido, o objeto afunda. Se a densidade do objeto for menor que a do líquido o objeto flutua.

O princípio de Arquimedes é utilizado em várias aplicações. Por exemplo, este princípio pode ser usado para determinar a pressão de um líquido conforme a sua profundidade.

5.1.2. BASE DO ROBÔ

Segundo o princípio de Arquimedes, apresentado na sub-subsecção anterior, existem vários tipos de materiais que podem flutuar sobre a água, bastando para tal terem uma densidade inferior à da água.

Tendo em consideração o exposto, e devido às suas densidades serem inferiores à da água, foram considerados dois tipos de materiais para proceder à aplicação na extremidade das pernas do robô: cortiça e esferovite. Para decidir qual dos dois materiais seria o mais indicado, foi necessário aplicar o princípio de Arquimedes, ou seja, utilizar a equação (2) para se proceder ao cálculo das forças da impulsão. Para tal, foi também utilizada a Tabela 7 para consultar as densidades da cortiça, do esferovite e da água.

A massa do robô (m), com consideração de todo o *hardware* necessário, é de 1,600 kg. Dividindo esse valor por quatro, número de pernas sobre as quais o robô se apoia, obtém-se uma massa de 0,400 kg por perna. Sabendo que a aceleração da gravidade (g) é de 9,81 m/s², facilmente se calcula o valor da força da impulsão.

$$\vec{I} = m \times g \quad (3)$$

$$\vec{I} = 0,400 \times 9,81 = 3,924N \quad (4)$$

Assim, sabe-se que é necessário uma força de impulsão de 3,924 N, para cada perna. Calculando o volume necessário dos materiais, pelo princípio de Arquimedes:

$$3,924 = (1000 - 240) \times V \times 9,81 \quad (5)$$

$$V = \frac{3,924}{(1000 - 240) \times 9,81} = 0,000526 \text{ m}^3 = 526 \text{ cm}^3 \quad (6)$$

As equações (5) e (6) permitem calcular o volume necessário de cortiça na extremidade de cada perna para suportar o robô. As equações (7) e (8) permitem efetuar os mesmos cálculos para o esferovite.

$$3,924 = (1000 - 15) \times V \times 9,81 \quad (7)$$

$$V = \frac{3,924}{(1000 - 15) \times 9,81} = 0,000406 \text{ m}^3 = 406 \text{ cm}^3 \quad (8)$$

Analisando os resultados, verifica-se que o esferovite é o material mais adequado para efetuar os ensaios por apresentar um menor volume necessário para sustentar o robô à superfície da água.

Para o volume indicado, definiram-se as dimensões do apoio em cada perna como sendo 20 cm de comprimento, 5 cm de largura e 4 cm de altura. Em relação à altura decidiu-se, por questões de segurança, acrescentar mais 1 cm resultando na dimensão final de 20 × 5 × 5 cm para cada bloco de esferovite. Na Figura 33 pode-se visualizar o robô após a integração dos apoios e o Anexo B apresenta um esquema com a representação detalhada das dimensões dos apoios das pernas do robô.

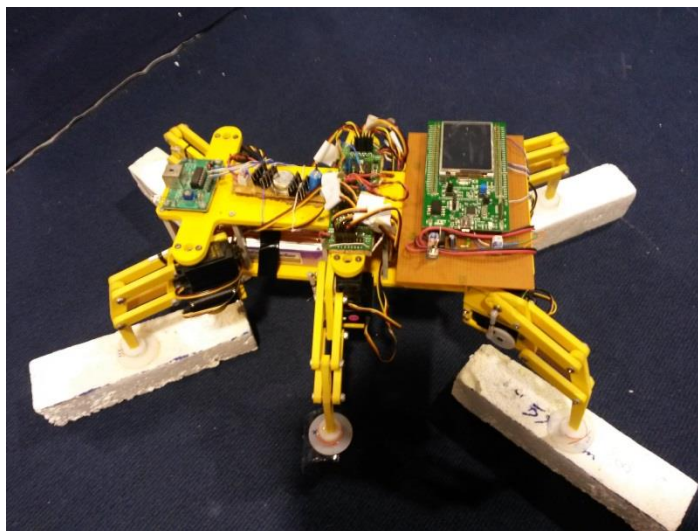


Figura 33 Robô hexápode alterado.

Para acoplar estas bases às pernas do robô, implementou-se um acessório de *nylon*, como se pode verificar na Figura 34, de forma a ser possível retirar os apoios para se transportar mais facilmente o robô.

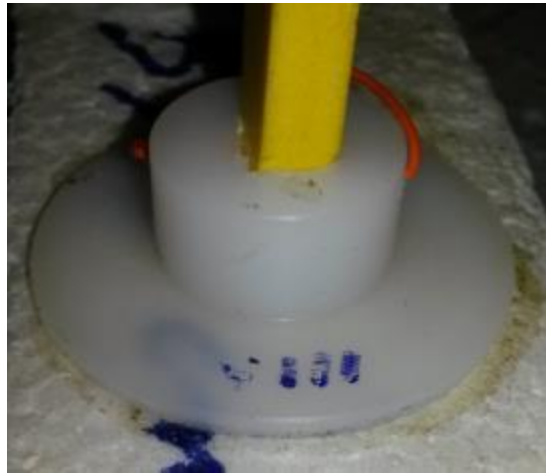


Figura 34 Acessório de nylon.

Para facilitar a locomoção do robô na água utilizou-se uma peça de plástico nas pernas do meio, com uma curvatura de 90°. Na Figura 35 pode-se ver uma imagem de uma destas peças.



Figura 35 Extremidade das pernas do meio.

5.2. CONTROLO DO ROBÔ

Esta secção tem como objetivo a descrição das características principais do sistema de controlo da locomoção do robô, descrevendo o funcionamento interno das comunicações de todos os componentes que o constituem.

Como foi visto anteriormente, a placa STM32F429IDISCOVERY contém as características necessárias para o controle dos servomotores e para a comunicação com o sensor IRPD.

Na Figura 36 apresenta-se um fluxograma que descreve o princípio geral de funcionamento do programa implementado.

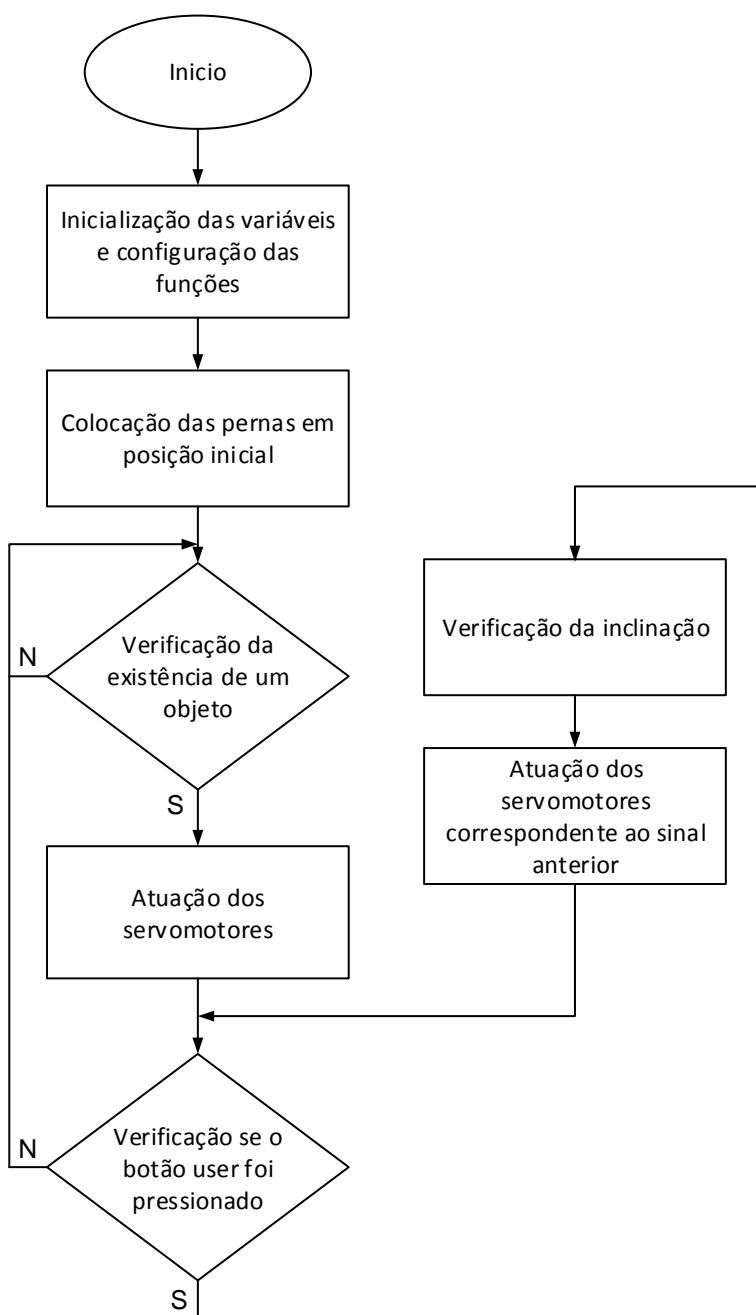


Figura 36 Fluxograma do funcionamento geral do programa.

5.2.1. CONTROLO DOS SERVOMOTORES

Para efetuar o controlo dos servomotores a placa STM32F429IDISCOVERY tem de comunicar com o controlador Mini SSC II. Este último é uma placa intermédia que estabelece a comunicação com os servomotores. Esta placa comunica através do protocolo RS-232, e a placa STM32F429IDISCOVERY comunica através da *Asynchronous Receiver Transmitter* (USART).

A placa Mini SSC II utiliza um sinal invertido, isto é, quando o sinal lógico é “0”, a placa espera por um sinal com uma tensão de 5 V. Quando o sinal lógico é “1”, espera por um sinal com tensão 0 V. A Figura 37 é um exemplo demonstrativo desta diferença. O gráfico em cima diz respeito à placa Mini SSC II e o de baixo à placa da STM32F429IDISCOVERY.

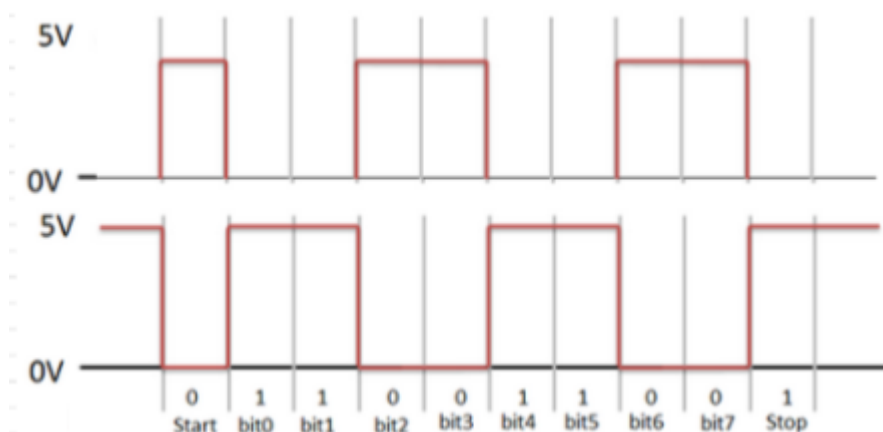


Figura 37 Diferenças entre as duas comunicações.

Assim, foi utilizado um componente de portas lógicas negadas (NAND), o HD74LS00P [27], que permite converter o estado lógico de um sinal, invertendo a sua tensão. O esquema de ligações utilizado foi o apresentado na Figura 38.

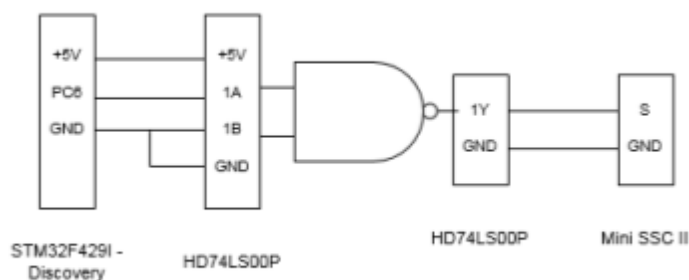


Figura 38 Esquema de ligações STM32F429IDISCOVERY - HD74LS00P - Mini SSC II.

De seguida foi efetuada a configuração das portas da placa STM32F429IDISCOVERY, começando por incluir no projeto as bibliotecas a utilizar, “stm32f4xx_usart.h” e “stm32f4xx_gpio.h”. Estas bibliotecas possuem funções próprias de envio de sinais através da USART.

```
#include <stm32f4xx_usart.h>
#include <stm32f4xx_gpio.h>
```

Como a placa principal possui vários pinos para proceder à comunicação através da USART, foi necessário configurar o pino de saída escolhido (pino PC6). Para tal, criou-se uma função de inicialização, denominada “void init_usart6()”, que permite configurar com as especificações descritas na Subsecção 4.2.3. A Figura 39 apresenta um fluxograma da configuração, e a Figura 40 um exemplo de como o motor se movimenta.

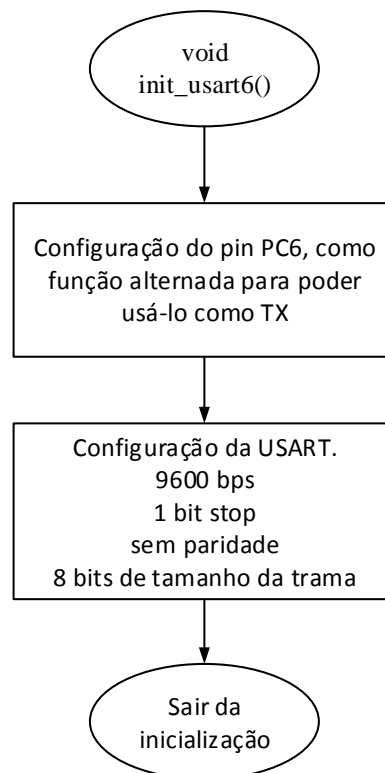


Figura 39 Configuração da *USART*.

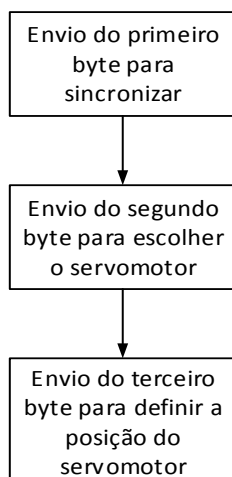


Figura 40 Exemplo de movimentação do servomotor.

5.2.2. LEITURA DO SENSOR IRPD

O sensor do módulo IRPD permite ao robô detetar a direção para a qual se deve movimentar. Inicialmente o robô espera pela deteção de um objeto, comunicando com a placa, de modo a processar a informação sobre a direção em que o objeto se encontra. De seguida movimenta-se no sentido do objeto.

Como referido na Secção 4.4, a placa IRPD necessita que algum dos sensores, da direita ou da esquerda, sejam alimentados durante o teste do recetor. Foram configurados dois pinos para as saídas (PD5 e PD3) e um para a leitura (PD1). Na Figura 41 pode-se verificar um exemplo de como é efetuada essa leitura.

5.2.3. LEITURA DO GIROSCÓPIO

A comunicação com o componente L3GD20 é feita internamente na placa, por este estar implantado na placa principal (STM32F429IDISCOVERY). Inicialmente é necessário incluir as bibliotecas `"stm32f429i_discovery_l3gd20.h"` e `"stm32f429i_discovery.h"`, para se poder aceder às funções do giroscópio.

A configuração do giroscópio tem como principais parâmetros o sinal de saída, a largura de banda, a forma como são atualizados os dados e a escala em que vai trabalhar. Na Figura 42 pode-se ver o fluxograma com as etapas necessárias a proceder.

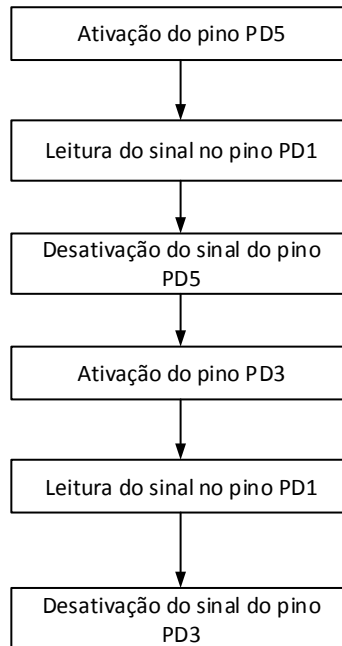


Figura 41 Exemplo da comunicação da placa STM32F429IDICOVERY com o módulo IRPD.

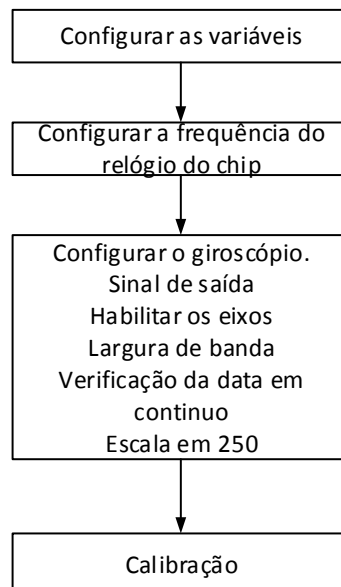


Figura 42 Exemplo da configuração do giroscópio.

Sempre que ocorre uma movimentação rotacional num dos eixos X , Y e Z , o robô vai proceder à movimentação das pernas de forma a contrariar esse movimento, levantando ou baixando as pernas. O giroscópio fornece a velocidade angular do movimento e não a posição em que se encontra.

5.3. PROCESSO DE MOVIMENTAÇÃO

Esta secção encontra-se dividida em duas partes. Inicialmente explica-se o procedimento para a movimentação do robô dependendo do sinal obtido pelo módulo IRPD e, de seguida, a movimentação do robô de forma a manter o seu corpo nivelado. Estes dois tipos de movimentação são alternados sempre que é pressionado o botão *user*.

5.3.1. MOVIMENTAÇÃO COM O MÓDULO IRPD

No início de cada ciclo faz-se uma verificação da existência de um objeto; após essa verificação, pode-se concluir o sentido de movimentação desejada a efetuar para que o robô se desloque de encontro ao objeto. A Figura 43 mostra a sequência das ações a implementar para se verificar este comportamento.

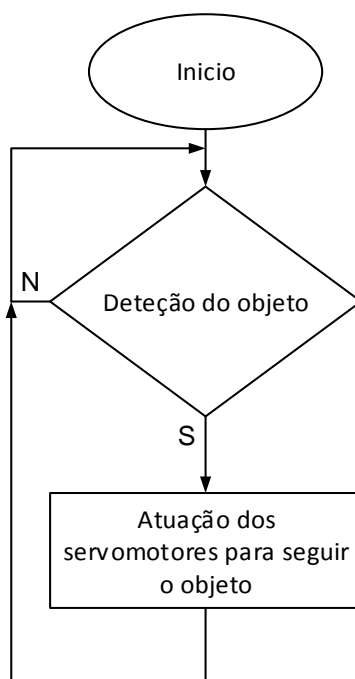


Figura 43 Sequência de movimentação.

A movimentação dos servomotores vai-se proceder de forma simples – vai ser executado um movimento de cada vez e no final desse movimento vai-se utilizar um tempo de espera para que os servomotores possam concluir o movimento. Por exemplo, para o caso de uma movimentação em frente a sequência das ações a implementar encontra-se descrita no fluxograma da Figura 44.

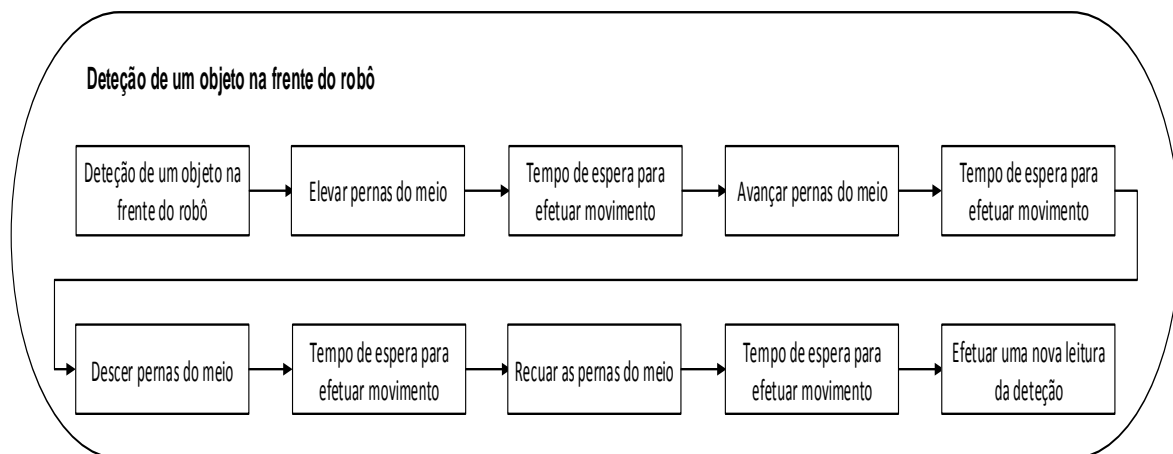


Figura 44 Sequência de movimentação dos servomotores.

5.3.2. MOVIMENTAÇÃO COM O GIROSCÓPIO

Em termos de atuação dos servomotores esta movimentação é semelhante à anterior: após cada atuação existe um tempo de espera para motores terem tempo de se posicionar. A única diferença é no tipo de movimento, sendo um movimento somente na vertical.

Nesta etapa o robô vai tentar manter o seu corpo nivelado, pelo que é necessário atuar todas as pernas. A atuação vai ser sempre em “oposição” à resposta obtida pelo componente L3GD20. Por exemplo, se o programa recebe a indicação que o seu corpo foi inclinado para a direita, o robô vai tentar compensar, baixando as pernas direitas e elevando as pernas esquerdas, ficando assim com o corpo nivelado.

Esta parte do programa foi desenvolvida para que o robô mantenha o seu corpo equilibrado em águas turbulentas.

6. TESTES REALIZADOS À LOCOMOÇÃO DO ROBÔ

Este capítulo tem como objetivo descrever uma série de testes efetuados com o robô, de modo a determinar o melhor padrão de locomoção para a movimentação do robô.

6.1. LOCAL DE ENSAIO

Todos os testes foram realizados no tanque do Laboratório de Sistemas Autônomos (LSA) do Instituto Superior de Engenharia do Porto. As dimensões do tanque são de dez metros de comprimento e seis metros de largura. Na Figura 45 pode visualizar-se uma imagem do tanque.

Tendo em conta a autonomia da bateria, e de modo a facilitar o resgate do robô no final de cada teste, a área de teste foi limitada a um metro de largura por três metros de comprimento.

Numa primeira fase foram realizados testes de fluabilidade e estabilidade, de modo a testar a resistência do robô sobre a água. De seguida realizaram-se testes da locomoção, tendo como variáveis independentes o tempo de ciclo da movimentação das pernas do meio e a sua amplitude.



Figura 45 Tanque do LSA

6.2. TESTES PRELIMINARES

6.2.1. TESTES DE FLUTUABILIDADE E ESTABILIDADE

Os primeiros testes efetuados ao robô consistiram em testar os seus apoios em termos de flutuabilidade, de forma a otimizar a sua estabilidade sobre a água. No primeiro teste verificou-se que os apoios das pernas do robô sofriam uma inclinação acentuada, como é possível ver na Figura 46, provocando assim alguns problemas de flutuabilidade e estabilidade na sua locomoção.

Como tal, foi trocado o ponto de contacto entre as pernas e o esferovite, deslocando esse ponto para o meio do apoio, como demonstra a Figura 47.

Deste modo conseguiu-se que o apoio ficasse mais estável sobre a água, melhorando assim a flutuabilidade do robô.

6.2.2. TESTES DO GIROSCÓPIO

Foram também realizados ensaios preliminares para testar a capacidade de resposta do robô, em termos de movimentação dos seus membros, para situações de inclinação do seu corpo.



Figura 46 Primeiro teste efetuado ao apoio.



Figura 47 Segundo teste efetuado ao apoio.

A plataforma utilizada para estes testes, como demonstra a Figura 48, foi uma base de madeira com uma área de $44,5 \times 32,5$ cm. Neste ponto testou-se qual seria o ângulo máximo de inclinação ao qual o robô conseguia reagir com eficiência.

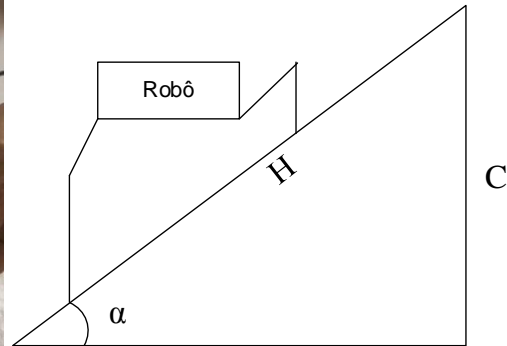
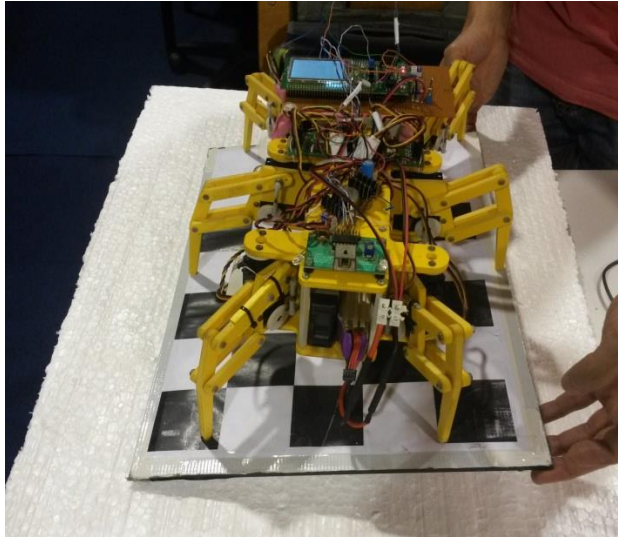


Figura 48 Teste de inclinação do robô.

Para se calcular este ângulo foi utilizada a expressão (9), verificando-se que devido à sua estrutura mecânica o robô tem o mesmo comportamento para todos os lados.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{C}{H}\right) \quad (9)$$

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{3,5}{44,5}\right) = 4,51^\circ \quad (10)$$

Os testes realizados permitiram concluir que o robô consegue ajustar a sua posição para uma altura máxima de 3,5 cm. Deste modo, como demonstra a expressão (10), conclui-se que o ângulo máximo ao qual o robô consegue responder devido aos seus graus de liberdade é de 4,51°. Para a realização destes testes utilizou-se um nível, como é possível verificar na Figura 49.

6.3. TESTES DA LOCOMOÇÃO

Para a realização de testes a vários padrões de locomoção, o objetivo passou por identificar quais seriam os melhores parâmetros para o movimento das pernas do meio. Para tal, decidiu-se medir o tempo de deslocamento do robô numa trajetória de três metros, e calcular a respetiva velocidade média. Como o robô utiliza uma placa de IRPD para se orientar, foi necessário aplicar um fio de pesca com um papel sobre a trajetória pretendida

para o robô. O papel permite guiar o robô durante os três metros do percurso, como demonstra a Figura 50.

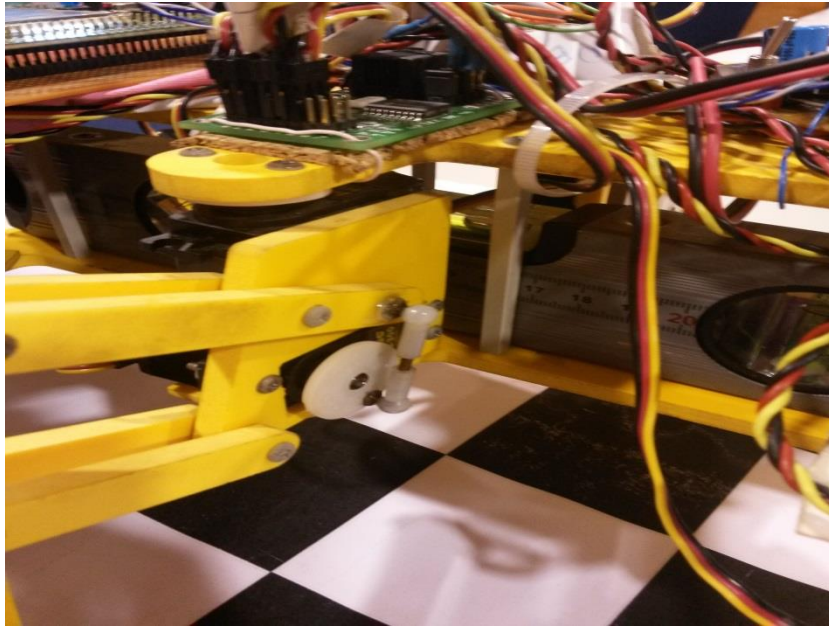


Figura 49 Robô com o nível usado nos testes.

Foram realizados testes para cinco amplitudes de movimento das pernas diferentes (46° , 60° , 74° , 88° e 101°), sendo que para cada amplitude foram testados cinco tempos de ciclo diferentes. Os tempos de ciclos testados variam entre 0,3 a 0,7 s, inclusive, com intervalos de 0,1 s. Com o objetivo de obter resultados mais robustos, optou-se por efetuar cinco repetições para cada teste, e considerar a média das cinco medições. A amplitude máxima de movimento das pernas foi de 101° devido às limitações mecânicas do robô.

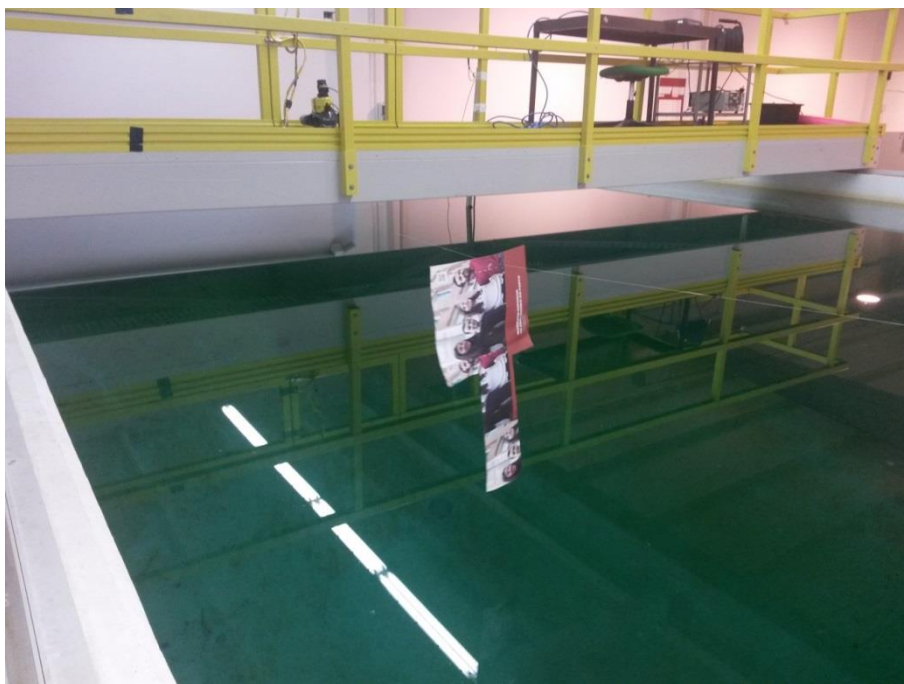


Figura 50 Vista do papel com a função de guia.

Meramente a título exemplificativo, a Tabela 8 apresenta os resultados de um teste para uma amplitude de 101° e um tempo de ciclo de 0,3 s. São apresentados resultados de velocidade média para 5 medições independentes. As diferenças nos valores de velocidade advêm do facto de o robô ter de efetuar algumas correções de direção durante o seu percurso, sendo que para umas situações são efetuadas mais correções que para outras, devido à aleatoriedade inerente à ondulação criada pela sua movimentação. O valor da velocidade média a ser considerada neste teste exemplificativo seria então de 0,05659 m/s.

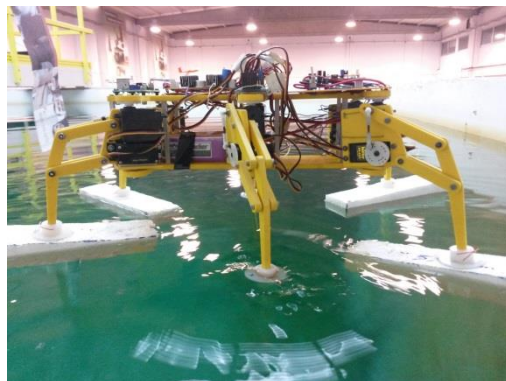
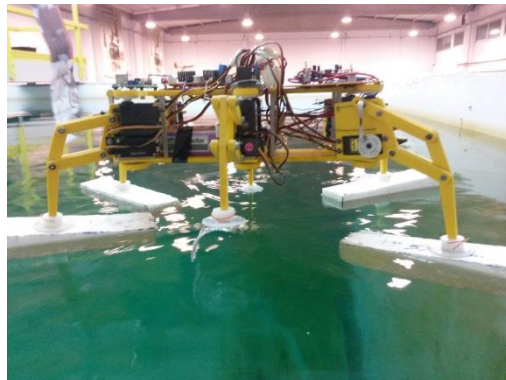
Tabela 8 Testes para uma amplitude de 101° com um tempo de ciclo 0,3 segundos

Amplitude (graus)	Tempo de ciclo (s)	Velocidade média (m/s)
101	0,3	0,056508
		0,052356
		0,057915
		0,058893
		0,057296

Como se pode visualizar na Figura 51 quando o robô efetua uma correção de direção apenas uma das pernas do meio é movimentada, ficando a outra parada até esta correção ter sido finalizada.

6.3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.

A Figura 52 apresenta a variação da média das velocidades médias medidas, para cada valor de amplitude, em função dos valores de tempo de ciclo testados. De uma forma geral, verifica-se que a velocidade do robô aumenta com o aumento da amplitude de movimento das pernas do meio.



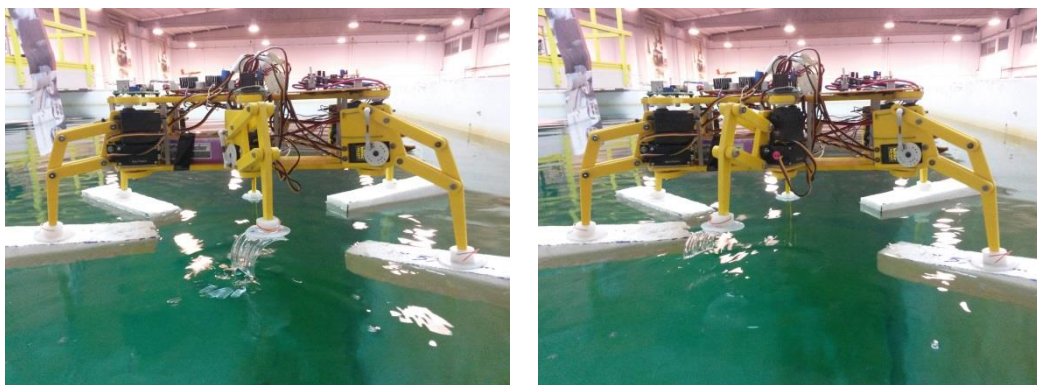


Figura 51 Sequência de imagens de uma correção de direção.

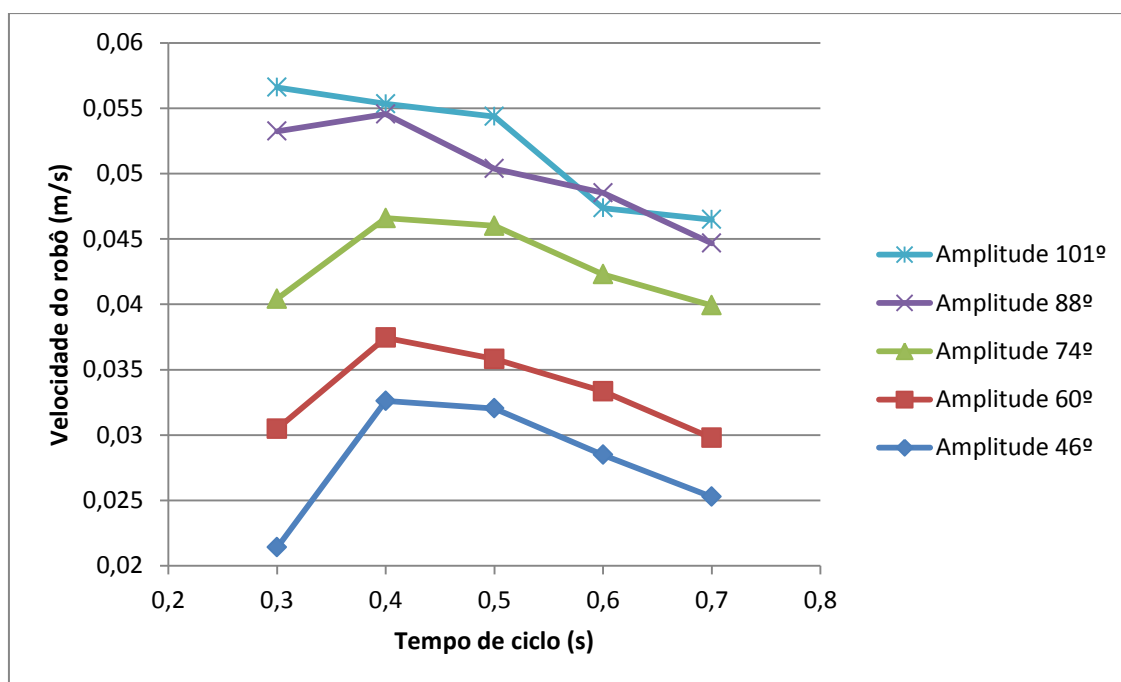


Figura 52 Gráfico ilustrativo da variação das velocidades.

Analisando o gráfico com maior detalhe, verifica-se que para uma amplitude de 101°, o robô obteve uma melhoria em termos de velocidade, exceto para o caso de tempo de ciclo de 0,6 s, em que a velocidade para uma amplitude de 88° foi superior. Esta diferença advém do facto de o robô ter necessitado de efetuar mais correções na direção.

Focando a análise para o tempo de ciclo de 0,4 s, verifica-se que, de uma forma geral, é neste tempo de ciclo que todos os valores de amplitude atingem o seu pico de velocidade. Tal pode ser explicado pelo facto de ser um tempo de ciclo mais curto que não excede a capacidade de resposta dos servomotores, como acontece para o tempo de ciclo de 0,3 s. Para este último valor do tempo de ciclo, a velocidade verifica um decréscimo para quase todas as amplitudes testadas devido ao facto do tempo de resposta dos servomotores ser de

0,2 s por 60° , e o robô ter um movimento vertical de 150° . Logo, e principalmente para valores menores de amplitude, o robô não tem capacidade de finalizar as instruções de subida da perna antes de começar a executar as instruções de descida da perna, acabando por não conseguir retirar a perna da água atempadamente.

7. CONCLUSÕES

Nos últimos anos os investigadores na área da robótica têm demonstrado uma enorme curiosidade pelos animais e os seus padrões de locomoção. Os movimentos destes animais são adaptáveis a diversos tipos de ambientes, assim o desenvolvimento de robôs com a capacidade de recriar os seus movimentos torna-se bastante cativante.

Com base nessa abordagem, o trabalho apresentado efetua a adaptação de um robô hexápode de forma a tentar recriar a locomoção do inseto Alfaiate sobre a água. Esta adaptação passou por diversas fases até estar concluída, todas elas importantes para o projeto.

Numa primeira fase, efetuou-se o estudo do comportamento biológico do inseto Alfaiate, de modo a compreender o seu padrão de movimentação sobre a água e como este conseguia manter-se estável sem quebrar a tensão de superfície. De seguida analisaram-se os robôs já existentes inspirados no Alfaiate, de forma a retirar conclusões sobre os seus sistemas de locomoção e controlo.

Na fase de desenvolvimento da arquitetura, verificou-se quais os módulos de controladores do robô hexápode existente que iriam ser aproveitados para o novo protótipo, tendo-se optado por um controlador mais atual e capaz de fazer a comunicação entre os módulos aproveitados.

Durante a implementação estudou-se a forma de manter o robô à superfície da água; para isso analisaram-se dois materiais diferentes, tendo-se optado pela utilização de esferovite

devido aos seus resultados. Nesta fase sentiram-se alguns problemas na comunicação da placa STM32F429IDISCOVERY com o controlador Mini SSC II, tendo este problema sido resolvido com a adição de um componente para servir de interface.

Nos testes experimentais efetuados na água, constatou-se que a locomoção do robô apresentava pouca estabilidade, sendo necessário ajustar o local de contacto das suas pernas com o apoio de esferovite. O problema foi corrigido e procedeu-se ao ensaio do giroscópio.

Em relação ao controlo do nivelamento do corpo do robô utilizando o giroscópio, concluiu-se que este não seria o mais indicado para esta situação, uma vez que o giroscópio fornece a velocidade angular da deslocação e não a posição atual do corpo. Logo, quando o robô se encontra sobre a água, e efetua o movimento de correção de nivelamento do corpo, o giroscópio fornece outra leitura, devido ao suporte não ser um terreno sólido, obrigando assim o robô a corrigir novamente corpo.

Numa fase posterior ao controlo de estabilidade do robô, avaliou-se diferentes padrões de locomoção. Foi possível verificar que a variação de 0,1 segundo no tempo de ciclo, assim como a alteração da amplitude do movimento, têm uma grande influência na velocidade média. A análise dos resultados destes testes permitiu combinar as duas variáveis para chegar ao melhor padrão de locomoção.

Como trabalho futuro, propõe-se o melhoramento deste protótipo de robô inspirado na biologia do Alfaiate, como por exemplo, através da aplicação de um acelerómetro de três eixos, que agregado com o giroscópio, possibilitará obter uma leitura mais exata da inclinação do robô. Tal deve-se à combinação destes dois componentes funcionar de forma similar a um nível. Deste modo, com esta combinação seria possível testar o funcionamento do robô em águas com ondulação.

Adicionalmente poder-se-ia complementar os sensores IRPD com informação visual com recurso a um sistema de visão que permita detetar obstáculos do sistema, visto que seria necessário a inclusão de um sistema computacional que efetue processamento de imagem e com base nessa informação redefinir a locomoção do robô.

Em termos mecânicos, a sua estrutura poderá ser melhorada de forma a ficar mais leve e mais pequena, de modo a se assemelhar o inseto Alfaiate a nível estrutural.

Uma outra linha de trabalho possível passaria pela integração de um módulo de rádio frequência, para ser possível controlar a velocidade do robô, assim como a sua trajetória, através de um comando.

Não foi possível implementar as alterações sugeridas devido a dificuldades surgidas durante o desenvolvimento do protótipo.

Com o desenvolvimento deste projeto foi possível adquirir novos conhecimentos, tanto a nível teórico como a nível de implementação. No primeiro caso, destaca-se a aprendizagem dos principais padrões de locomoção característicos das espécies animais e das aplicações mais comuns existentes na área da robótica. A nível prático, os conhecimentos adquiridos focam-se sobretudo na programação de microcontroladores e no projeto de robôs a nível mecânico e estrutural.

Referências Documentais

- [1] J. W. Bush e D. L. Hu, “Walking on water,” *Physics Today*, p. 2, 2010.
- [2] D. L. Hu, B. Chan e J. W. M. Bush, “The hydrodynamics of water strider,” *Nature*, vol. 424, pp. 663-666, 2003.
- [3] K. Suzuki, “Bio-Inspired Water Strider Robots with Microfabricated Functional Surfaces,” em *Biomimetics Learning from Nature*, Amitava Mukherjee, 2010, pp. 363-384.
- [4] M. Silva, “Sistemas Robóticos de Locomoção Multipernas,” Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [5] D. Kar, K. K. Issac e K. Jayarajan, “Gaits and energetics in terrestrial legged locomotion,” *Mechanism and Machine Theory*, vol. 38, n.º 4, p. 355–366, 2003.
- [6] M. Hildebrand, “Symmetrical Gaits of Horses,” *Science*, vol. 150, pp. 701-708, 1965.
- [7] V. H. Resh e R. T. Cardé, *Encyclopedia of Insects (Second Edition)*, Academic Press, 2009.
- [8] C. M. B. Rodrigues, “Sistemas de Locomoção com Quatro ou Mais Patas,” Porto, 1998.
- [9] R. Siegwart e I. Nourbakhsh, “Introduction to Autonomous Mobile Robots,” A Bradford Book, 2004.
- [10] P. Liljeback, K. Y. Pettersen, O. Stavdahl e J. T. Gravdahl, *Snake Robots: Modelling, Mechatronics, and Control*, London: Springer-Verlag, 2013.
- [11] M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, e R. Playter, “BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot,” Boston Dynamics, Boston, 2013.
- [12] Y. S. Song e M. Sitti, “Surface-Tension-Driven Biologically Inspired Water Strider Robots: Theory and Experiments,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, n.º 3, pp. 578-589, 2007.
- [13] B. Shih, L. Laham, K. J. Lee, N. Krasnoff, E. Diller e M. Sitti, “Impact and Surface Tension in Water: a Study of Landing Bodies,” Bio-inspired Robotics Final Project, Carnegie Mellon University, 2012.
- [14] L. Wu, Z. Lian, G. Yang e M. Ceccarelli, “Water Dancer II-a: a Non-tethered Telecontrollable Water Strider Robot,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 8, n.º 4, pp. 10-17, 2011.
- [15] Scott Edwards Electronics, Inc., *Mini SSC II Serial Servo Controller*, 1999.
- [16] “Servodatabase,” [Online]. Available: <http://www.servodatabase.com/servo/hitec/hs-300>. [Acedido em 15 10 2014].

- [17] J. Silva, “PROJETO, DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ NADADOR DE INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA,” Porto, 2013.
- [18] Lynxmotion, Inc., *IRPD V er2.1 Infrared Proximity Detector*, 2002.
- [19] ST life.augmented, *Getting started with the STM32F429 Discovery kit*, 2013.
- [20] TS-UG-ARM, *Atollic TrueSTUDIO for ARM user guide*, 2012.
- [21] TRAINING PUBLICATIONS DIVISION, Sincros, *Servomecanismos e Fundamentos de Giros*, Hemus, 2004.
- [22] ST life.augmented, *L3GD20*, STMicroelectronics group of companies, 2013.
- [23] STMicroelectronics group of companies, *L7800 Series*, 2004.
- [24] STMicroelectronics group of companies, *LM323*, 2008.
- [25] “A ciência em si,” [Online]. Available: <http://ciencia-em-si.webnode.pt/products/principio-da-flutuabilidade/>. [Acedido em 10 10 2014].
- [26] C. Pickover, *Archimedes to Hawking: Laws of Science and the Great Minds Behind Them*, Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [27] Renesas, *HDL74LS00 Quadruple 2-Input NAND Gates*, 2005.
- [28] “Farnell,” [Online]. Available: <http://pt.farnell.com/stmicroelectronics/stm32f429i-disco/stm32f4-discovery-eval-board/dp/2355377>. [Acedido em 20 10 2014].

Anexo A. Esquema de ligações do *hardware*

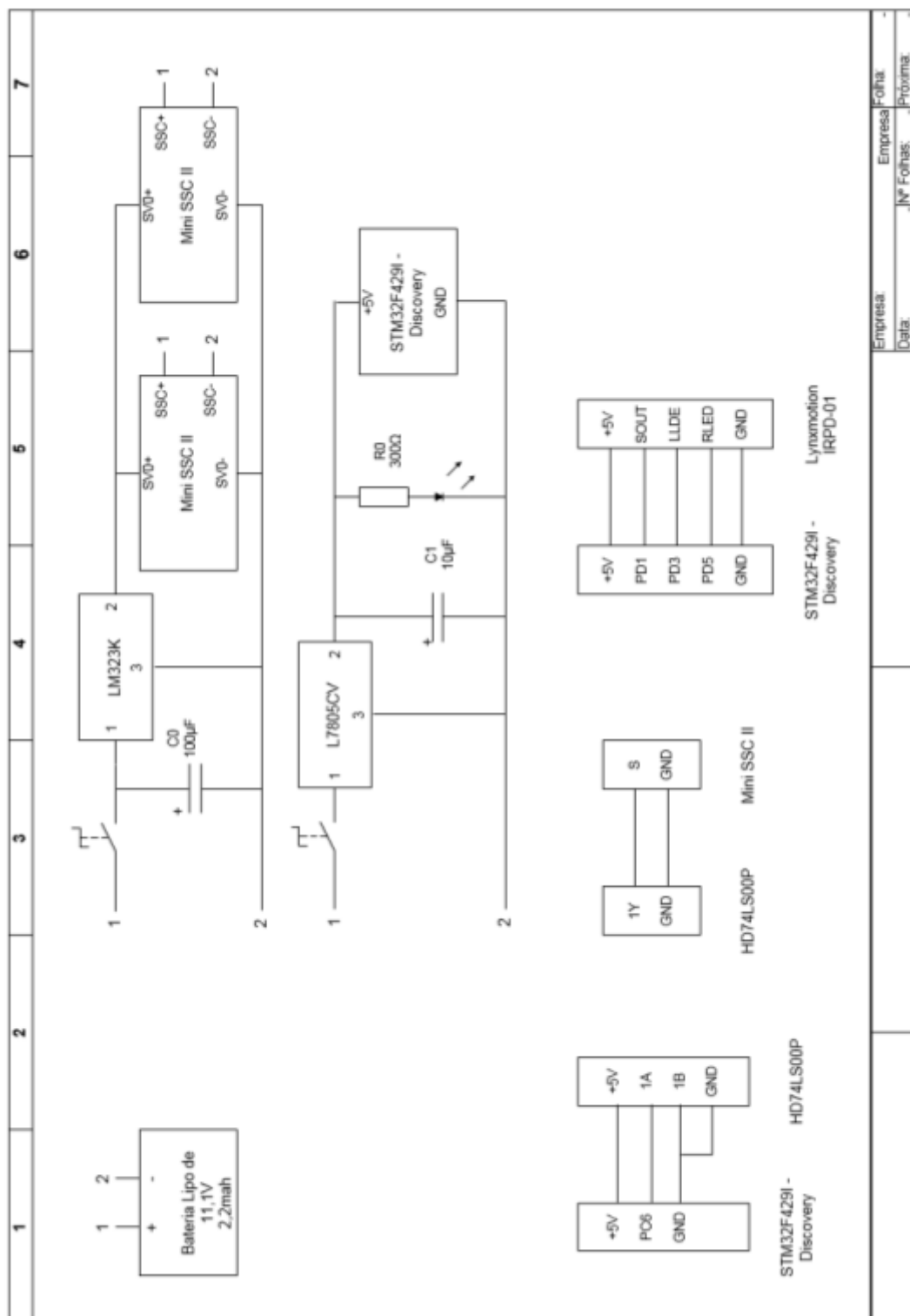


Figura 53 Esquema elétrico das ligações do *hardware* geral.

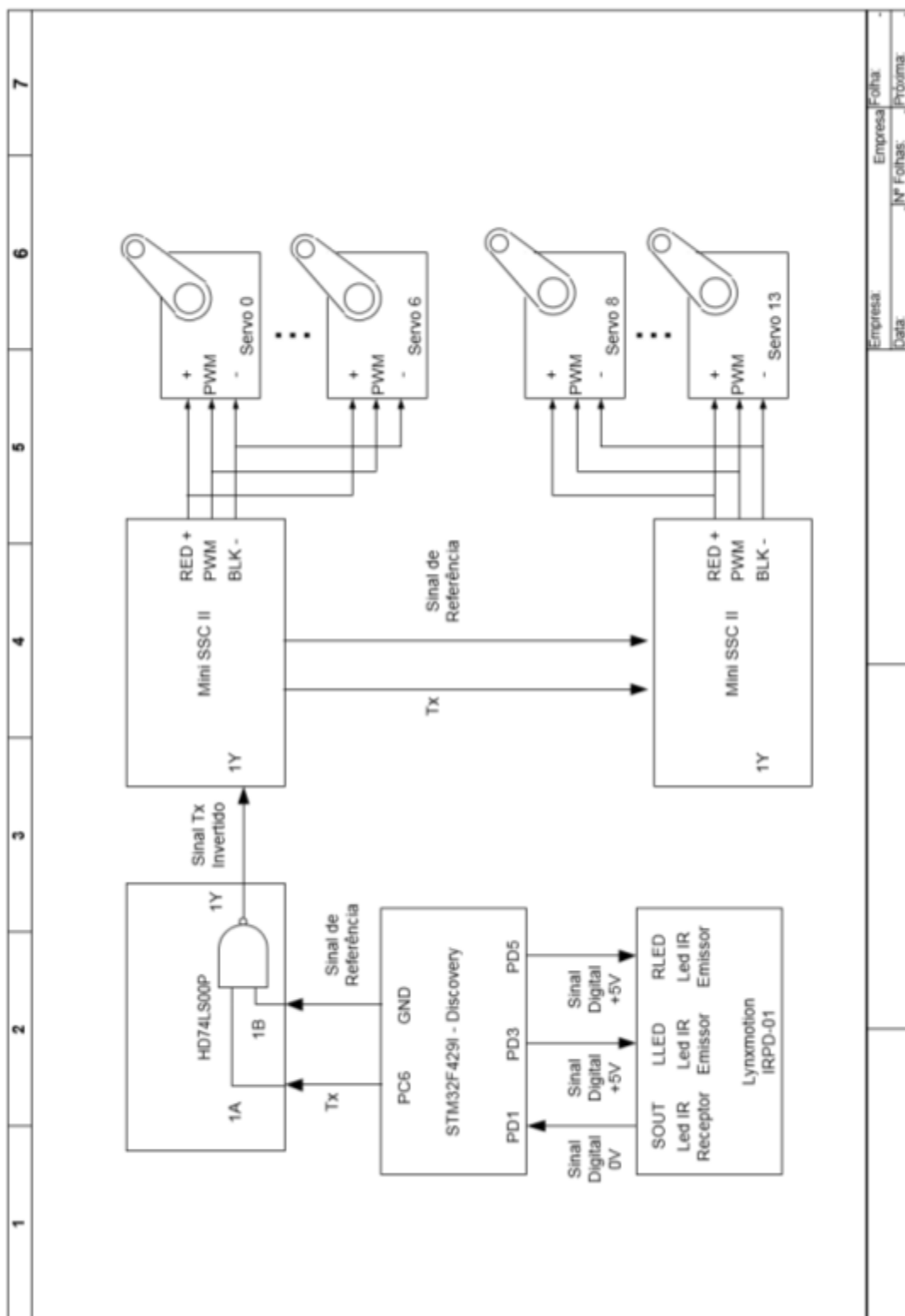


Figura 54 Esquema de ligações mais detalhado.

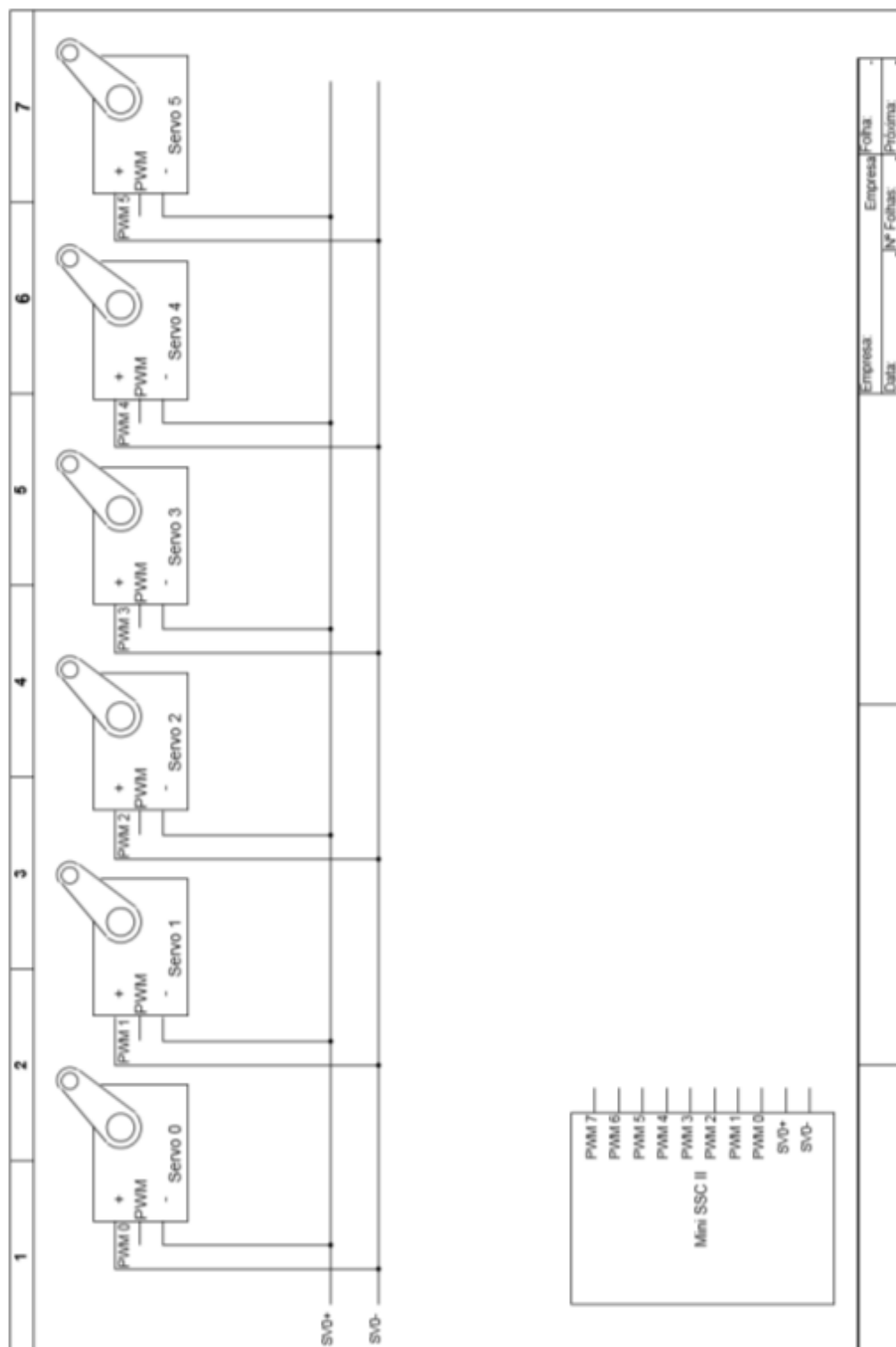


Figura 55 Esquema de ligações das placas Mini SCC II aos servos motores.

Anexo B. Dimensões dos apoios para o robô hexápode

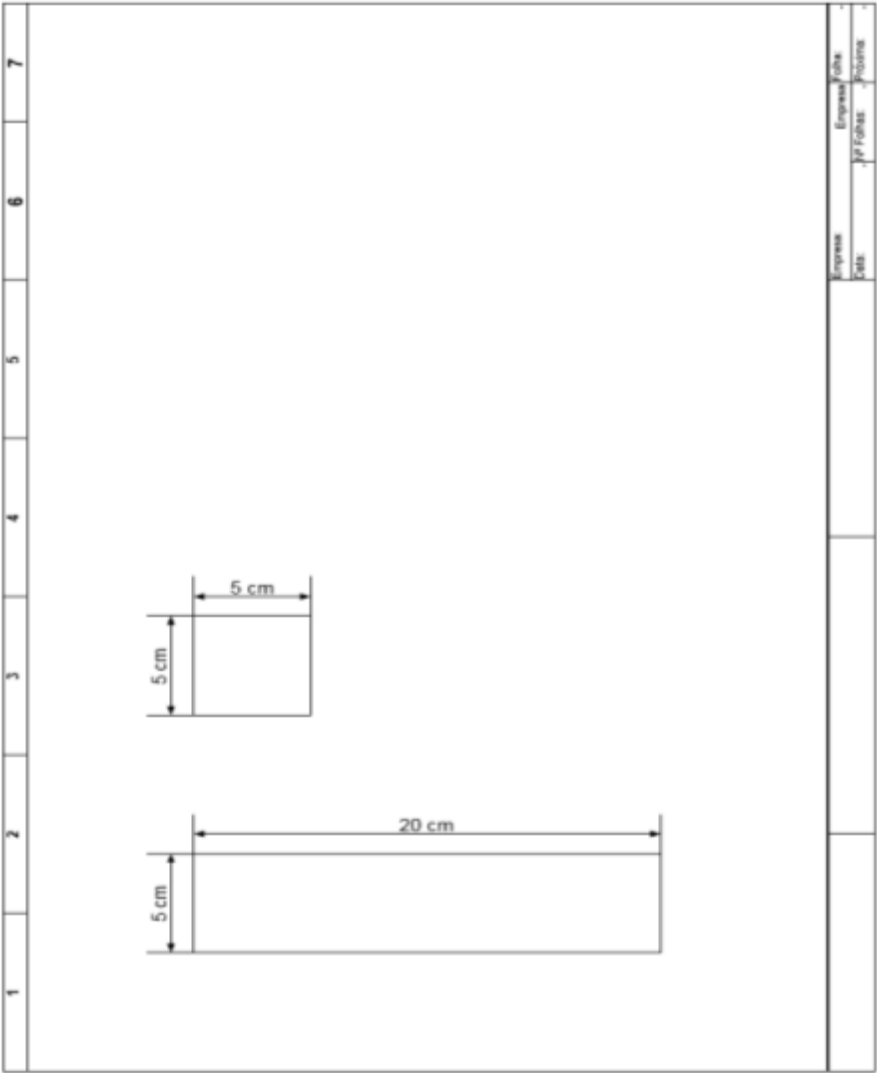


Figura 56 Dimensões dos apoios para o robô hexápode.